



**Sistema de agricultura inteligente con entorno de realidad virtual mediante el uso de
tecnología LoRa orientado a minimizar el estrés abiótico**

Chiliquinga Malliquinga, Mauricio Danilo y Mañay Chochos, Edison David

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica

Centro de Estudios de Posgrado

Maestría en Electrónica y Automatización mención Redes Industriales

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica y

Automatización mención Redes Industriales

Ing. Granizo López, Rosa Angélica Mgs.

14 de octubre de 2021



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

CENTRO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Sistema de agricultura inteligente con entorno de realidad virtual mediante el uso de tecnología LoRa orientado a minimizar el estrés abiótico**” fue realizado por los señores **Chiliquina Malliquinga, Mauricio Danilo y Mañay Chochos, Edison David** el mismo que ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 14 de octubre de 2021

.....
Ing. Granizo López, Rosa Angélica Mgs.

Directora

C.C.: 0502148828



Document Information

Analyzed document	Proyecto de Titulación_V5.1.pdf (D111854758)
Submitted	8/31/2021 3:25:00 AM
Submitted by	Lorena Ibarra
Submitter email	loretalbarra@yahoo.es
Similarity	8%
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Tesis_Cuichan_Saravia.pdf Document Tesis_Cuichan_Saravia.pdf (D62172882)	2
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10067/1/T-ESPEL-ENI-0347.pdf Fetched: 7/21/2020 11:12:21 AM	2
W	URL: https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/413/1/MoraDelgadoDiego%20M%20SIM%202020.pdf Fetched: 7/26/2020 4:37:02 AM	5
W	URL: http://hdl.handle.net/11349/13388 Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	3
SA	TT_LPWAN.pdf Document TT_LPWAN.pdf (D99283804)	3
W	URL: http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5945 Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	2
W	URL: http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6162/1/MUTC-000349.pdf Fetched: 2/3/2021 7:48:12 PM	1
W	URL: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18932 Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	2
W	URL: https://www.fertiberia.com/es/blog/2017/diciembre/agricultura-inteligente-2-agricultura-de-precision/ Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	6
W	URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	1
W	URL: https://andrescontrerasmendez.wordpress.com/2015/11/27/23/ Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	3
W	URL: https://www.agroptima.com/es/blog/agricultura-inteligente-ejemplos/ Fetched: 8/31/2021 3:26:00 AM	2

.....

Ing. Granizo López, Rosa Angélica Mgs.

Directora

C.C.: 0502148828



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

CENTRO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Chiliqinga Malliquinga, Mauricio Danilo y Mañay Chochos, Edison David** con cédula de ciudadanía N.º 050364283-7 y N.º 050361078-4 respectivamente, declaramos que este trabajo de titulación denominado **“Sistema de agricultura inteligente con entorno de realidad virtual mediante el uso de tecnología LoRa orientado a minimizar el estrés abiótico”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Latacunga, 14 de octubre de 2021

.....
Chiliqinga Malliquinga, Mauricio Danilo

C.C.: 0503642837

.....
Mañay Chochos, Edison David

C.C.: 0503610784



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

CENTRO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Chiliqinga Malliquinga, Mauricio Danilo y Mañay Chochos, Edison David**, autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMANDAS-ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación: **“Sistema de agricultura inteligente con entorno de realidad virtual mediante el uso de tecnología LoRa orientado a minimizar el estrés abiótico”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 14 de octubre de 2021

.....
Chiliqinga Malliquinga, Mauricio Danilo

C.C.: 0503642837

.....
Mañay Chochos, Edison David

C.C.: 0503610784

Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios por darme la fortaleza, por no dejarme vencer en los momentos difíciles y por haberme permitido llegar hasta este instante en mi formación profesional para culminar con éxito esta etapa de mi vida.

En memoria de mi Abuelito, aunque hoy no está aquí, vive por siempre en mi memoria y habita en mis recuerdos. Agradecer a mi Madre y Abuelita por ser la guía que me orientaron a mirar siempre hacia adelante y no decaer.

Agradecido con todas las personas que me han brindado su apoyo, que siempre me han dado razones para seguir y poner toda mi voluntad en lo que hago.

Mauricio Chiliquina

Primero dedico este proyecto a Dios, por darme salud y vida, por haberme entregado una oportunidad de superación profesional.

A mis padres Piedad y Sixto, por su apoyo incondicional, confianza, por creer en mí y en mis sueños, mi gratitud eterna los quiero mucho.

A mis abuelos Mariana y Segundo, a mis tíos Gloria, Alicia y Nelson, a mis primos queridos.

Y a toda mi familia y amigos, que siempre me han dado su apoyo moral e incondicional.

Edison Mañay

Agradecimiento

Gracias Dios, por darnos la fuerza y constancia para el desarrollo de este proyecto, culminando así una etapa más de nuestras vidas.

Expresamos un sincero agradecimiento a la Ingeniera Rosita Granizo y al Ingeniero Marcelo Álvarez por ser guías y de gran apoyo para culminar este proyecto.

A los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE que de una u otra manera nos brindaron sus conocimientos en el transcurso de la maestría.

Gracias, de todo corazón:

Mauricio Chiliquina y Edison Mañay

Tabla de contenidos	
Carátula.....	1
Certificado de Tutor	2
Reporte de Urkund	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos	8
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	17
Lista de abreviaturas.....	21
Resumen	22
Abstract.....	23
Definición del Proyecto	24
Antecedentes	24
Líneas de Investigación	26
Sub Líneas de Investigación	26
Área de Influencia.....	26
Planteamiento del Problema	26
Trabajos Relacionados	28
Justificación, Importancia y Alcance del Proyecto	29
Objetivos.....	31
<i>Objetivo General.....</i>	<i>31</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>32</i>
Hipótesis de Investigación	32

Categorización de las Variables de Investigación	32
Marco Teórico Referencial.....	34
<i>Marco Legal</i>	34
<i>Marco Conceptual</i>	35
Diseño de la Investigación (Materiales y Métodos)	36
Fundamentación Teórica.....	39
La Demanda y la Producción de Alimentos.....	39
Producción Sostenible y Desarrollo Rural.....	40
Descripción de la Agricultura en el Ecuador	40
La Agricultura en la Provincia de Cotopaxi	40
<i>Agricultores</i>	41
<i>Demanda de Producción Agropecuario</i>	42
El Cultivo de Papa	42
<i>Variación de Papa INIAP-Suprema</i>	43
<i>Características Morfológicas</i>	43
<i>Características Agronómicas</i>	44
El Estrés en las Plantas	44
<i>Tipos de Estrés</i>	45
<i>Factores Bióticos</i>	45
<i>Factores Abióticos</i>	46
El Estrés por Bajas Temperaturas.....	46
Cultivos en el Ecuador Expuestos a Descensos de Temperatura	46
<i>Variación de la Temperatura Mínima</i>	47
<i>Efectos de las Bajas Temperaturas en la Economía</i>	47
Heladas	48
<i>Definición de Heladas</i>	48

<i>Clasificación de las Heladas por su Efecto Visual</i>	49
Helada Blanca.....	49
Helada Negra	49
<i>Efectos de las Heladas</i>	50
<i>Métodos para Cuantificar Daños por las Heladas</i>	50
<i>Frecuencia de Heladas</i>	52
<i>Métodos de Protección Contra Heladas</i>	53
Técnicas de Protección Pasiva:	54
Técnicas de Protección Activa:.....	55
Riego por Aspersión - Multiflujo	56
Sistema de Agricultura Inteligente.....	56
<i>Parámetros de la Agricultura Inteligente</i>	57
<i>Parámetros de la Agricultura Inteligente para la Industria</i>	57
<i>Agricultura de Precisión.</i>	58
<i>El IoT en la Agricultura</i>	58
<i>Ventajas de la Aplicación del IoT en Agricultura</i>	58
<i>Tecnológicas del IoT en la Agricultura</i>	59
Etapas de las Tecnológicas del IoT en la Agricultura	59
Definición de IoT.....	60
<i>Redes de Área Amplia de Bajo Consumo</i>	61
<i>LoRa</i>	62
<i>LoRaWAN</i>	62
<i>Topología y Componentes de una Red LoRa</i>	63
<i>Métodos de Activación</i>	64
<i>Canales y Regulación del Espectro de Radiofrecuencia</i>	65
<i>Clases LoRa</i>	65

<i>Seguridad en LoRa</i>	66
Realidad Virtual en la Agricultura	66
<i>Plantas Virtuales</i>	66
<i>Aplicación de Tecnología de Realidad Virtual en la Enseñanza de la</i> <i>Agricultura</i>	67
<i>La Realidad Virtual y su Aplicación en la Agricultura</i>	67
<i>Uso de Realidad Virtual en la Agricultura</i>	68
<i>Elementos para Integración del Entorno de Realidad Virtual</i>	68
Energía Solar Fotovoltaica	70
Diseño e Implementación.....	72
Sistema de Agricultura Inteligente.....	72
Tecnologías Necesarias	75
<i>Arduino IDE</i>	75
<i>ESP32</i>	75
<i>Heltec WiFi LoRa 32 (V2)</i>	76
<i>TTGO ESP32 LoRa-OLED (V1)</i>	77
<i>Sensores</i>	77
Sensor de Temperatura y Humedad Relativa DHT21 (AM2301) ...	77
Sensor de Humedad de Suelo Capacitivo	78
Módulo ML8511 Detector UV	79
Diseño de la Red de Sensores	79
<i>Diseño de los Nodos Finales</i>	81
<i>Diseño del Módulo Coordinador Central</i>	85
Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario	88
<i>Plataforma Thinger.io</i>	88
Configuración del Dispositivo	90

Interfaz Gráfica.....	91
Base de Datos.....	92
Alarmas ..	92
Diseño de Algoritmos de Control para los Nodos y Coordinador Central	92
Diseño del Entorno de Realidad Virtual.....	99
<i>Elementos del Sistema de Realidad Virtual</i>	<i>100</i>
<i>Dispositivo de Visualización e Interacción</i>	<i>101</i>
<i>Espacio de Manipulación del Entorno VR</i>	<i>101</i>
<i>Integración del Entorno Virtual con el Dispositivo de Inmersión.....</i>	<i>102</i>
<i>Delineación del Entorno de Realidad Virtual</i>	<i>102</i>
<i>Diseño del Algoritmo del Entorno de Realidad Virtual</i>	<i>104</i>
<i>Disposición General del Entorno Virtual</i>	<i>107</i>
Diseño del Sistema de Alimentación Eléctrica con Energía Solar	107
<i>Consumo energético estimado</i>	<i>107</i>
<i>Dimensionamiento de paneles solares para una bomba de ½ hp.</i>	<i>108</i>
<i>Dimensionamiento Banco de Baterías</i>	<i>109</i>
<i>Ubicación de la estación solar</i>	<i>110</i>
<i>Componentes del sistema de energía solar</i>	<i>111</i>
<i>Diseño del Sistema de Eléctrico.....</i>	<i>113</i>
<i>Emplazamiento de la Parcela de Riego</i>	<i>114</i>
Implementación.....	115
<i>Redes de Sensores.....</i>	<i>115</i>
<i>Módulo Coordinador Central</i>	<i>117</i>
<i>Plataforma Thinger.io</i>	<i>117</i>
<i>Entorno de Realidad Virtual</i>	<i>118</i>
Comportamiento Virtual de la Papa INIAP-Suprema.....	120

<i>Sistema de Energía Solar</i>	120
<i>Sistema de Riego por Aspersión</i>	121
<i>Sinergia del Sistema Implementado</i>	122
Resultados del Sistema	123
Parámetros de Cultivo de la Papa INIAP-Suprema	124
<i>Temperatura</i>	124
<i>Tipos de Suelo</i>	125
<i>Tipo de Semilla</i>	125
<i>Humedad</i>	125
<i>Luz</i>	125
<i>Altitud</i>	125
Factores Abióticos en el Cultivo de Papa	125
<i>La Papa a Temperaturas Bajas</i>	126
<i>Heladas</i>	126
Riego por Aspersión para Protección ante Bajas Temperaturas	126
<i>Aspersores por Encima del Cultivo</i>	127
<i>Criterios para la Activación Automática del Sistema de Riego</i>	127
<i>Parámetros de Puesta en Marcha y Parada</i>	128
<i>Activación del Sistema: Tipificación de una Helada Negra</i>	129
<i>Activación del Sistema: Tipificación de una Helada Blanca</i>	130
<i>Aplicación de Caudal</i>	132
<i>Tasas de Aplicación de Caudal</i>	132
Factores Climáticos en la Comunidad Chirinche Bajo	133
<i>La Temperatura y Humedad Relativa</i>	133
<i>Humedad del Suelo</i>	135
<i>Índice Ultravioleta (IUV)</i>	135

La Radiación Solar en los Cultivos de Campo Abierto.....	136
Análisis del Estrés Abiótico en el Cultivo de Papas.....	138
<i>Cálculo del Área de Cobertura de los Aspersores</i>	138
<i>Densidad de la Siembra</i>	139
Comportamiento Fisiológico de la Papa INIAP-Suprema	140
Análisis Comparativo de la Eficiencia del Proyecto Implementado.....	141
Análisis Económico	142
<i>Red de Sensores</i>	142
<i>Implementación del Entorno de Realidad Virtual</i>	144
<i>Sistema de Generación Eléctrica con Panel Solar</i>	145
Discusión de Resultados.....	147
Conclusiones y Recomendaciones.....	149
Conclusiones.....	149
Recomendaciones.....	150
Bibliografía	151
Anexos	163

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Trabajos Relacionados</i>	28
Tabla 2 <i>Operacionalización de las Variables</i>	33
Tabla 3 <i>Límites específicos para transmisores intencionales</i>	35
Tabla 4 <i>Matriz de diseño de investigación</i>	37
Tabla 5 <i>Principales productos por condición del cultivo, año 2013</i>	41
Tabla 6 <i>Población ocupada en agricultura, ganadería, silvicultura y pesca</i>	41
Tabla 7 <i>Proyecciones de población 2015-2025</i>	42
Tabla 8 <i>Características agronómicas en localidades a 2.630 msnm y 14º C de temperatura</i> 44	
Tabla 9 <i>Cultivos expuestos a descensos de temperaturas</i>	47
Tabla 10 <i>Distintos métodos para evaluar daños por heladas en papas</i>	51
Tabla 11 <i>Estaciones meteorológicas en la provincia de Cotopaxi</i>	52
Tabla 12 <i>Intensidad de heladas de la estación meteorológica de Rumipamba - Salcedo</i>	53
Tabla 13 <i>Técnicas de protección activa y pasiva contra efectos de las heladas</i>	54
Tabla 14 <i>Métodos de protección contra heladas, pasivos y activos</i>	54
Tabla 15 <i>Etapas tecnológicas del IoT en la agricultura</i>	59
Tabla 16 <i>Comparativa entre tecnologías LPWAN</i>	62
Tabla 17 <i>Bandas de frecuencia según la región</i>	65
Tabla 18 <i>Nodos finales</i>	82
Tabla 19 <i>Arquitectura de comunicación</i>	86
Tabla 20 <i>Thingier.io con cuenta gratis</i>	89
Tabla 21 <i>Características Inversor DC/AC</i>	113
Tabla 22 <i>Zona de intervención</i>	123
Tabla 23 <i>Temperatura, humedad relativa y temperatura del punto de rocío</i>	133
Tabla 24 <i>Índice Ultravioleta: categorías de exposición</i>	135
Tabla 25 <i>Recomendaciones de protección a UV</i>	136

Tabla 26 <i>Índice de radiación solar UV</i>	137
Tabla 27 <i>Comportamiento virtual sobre la papa INIAP- Suprema</i>	141
Tabla 28 <i>Comparación de variables climáticas</i>	142
Tabla 29 <i>Nómina de elementos de la red de sensores, costos en dólares americanos</i>	143
Tabla 30 <i>Características de una estación meteorológica</i>	144
Tabla 31 <i>Recursos necesarios para la implantación del entorno de realidad virtual</i>	145
Tabla 32 <i>Recursos para sistema de energía solar</i>	145
Tabla 33 <i>Comparación entre el sistema de riego implementado y una Motobomba</i>	146

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Los enfoques de la FAO</i>	39
Figura 2 <i>Prácticas para la producción y conservación de recursos naturales del Ecuador</i>	40
Figura 3 <i>Cultivos expuestos a descensos de temperaturas</i>	46
Figura 4 <i>Comportamiento horario de la temperatura</i>	48
Figura 5 <i>Helada blanca</i>	49
Figura 6 <i>Helada negra</i>	49
Figura 7 <i>Daño en plantas de papas afectadas por heladas 40 días después</i>	52
Figura 8 <i>Riego por aspersión</i>	56
Figura 9 <i>Soluciones para conectividad IoT</i>	60
Figura 10 <i>Relación entre el ancho de banda y alcance en tecnologías inalámbricas</i>	61
Figura 11 <i>Pila de funcionamiento LoRaWAN</i>	63
Figura 12 <i>Topología de una red LoRa</i>	63
Figura 13 <i>Componentes principales de una red LoRa</i>	64
Figura 14 <i>Interfaz de Unity 3D</i>	68
Figura 15 <i>Interfaz de Blender</i>	69
Figura 16 <i>Plataforma de streaming Virtual Desktop</i>	69
Figura 17 <i>Gafas de Realidad Virtual</i>	70
Figura 18 <i>Componentes de una planta fotovoltaica</i>	71
Figura 19 <i>Diagrama de flujo del sistema de agricultura inteligente</i>	73
Figura 20 <i>Diseño esquemático del sistema de agricultura inteligente</i>	74
Figura 21 <i>Arduino IDE</i>	75
Figura 22 <i>Módulo ESP32</i>	76
Figura 23 <i>Heltec WiFi LoRa 32 (V2)</i>	76
Figura 24 <i>TTGO ESP32 LoRa - OLED (V1)</i>	77
Figura 25 <i>DHT21</i>	78

Figura 26 <i>Sensor de humedad de suelo capacitivo</i>	78
Figura 27 <i>Sensor de humedad de suelo capacitivo</i>	79
Figura 28 <i>Diseño de la red de sensores con LoRa</i>	80
Figura 29 <i>Ubicación de los nodos en el terreno</i>	80
Figura 30 <i>Topologías de la red de sensores en el cultivo</i>	81
Figura 31 <i>Nodo 1: Diseño esquemático para el monitoreo de temperatura y humedad</i>	82
Figura 32 <i>Nodo 1: Diseño electrónico para el monitoreo de temperatura y humedad</i>	83
Figura 33 <i>Nodo 2: Diseño esquemático para el monitoreo de radiación UV</i>	83
Figura 34 <i>Nodo 2: Diseño electrónico para el monitoreo de UV</i>	84
Figura 35 <i>Nodo 3: Diseño esquemático del dispositivo de control final con relé</i>	84
Figura 36 <i>Nodo 3: Diseño electrónico del dispositivo de control final con relé</i>	85
Figura 37 <i>Arquitectura del coordinador central</i>	86
Figura 38 <i>Diseño esquemático del módulo coordinador central</i>	87
Figura 39 <i>Diseño electrónico del módulo coordinador central</i>	87
Figura 40 <i>Elementos para la funcionalidad de la interfaz de usuario</i>	88
Figura 41 <i>Diagrama de flujo del diseño de la interfaz gráfica de usuario</i>	89
Figura 42 <i>Registro del dispositivo a conectar</i>	90
Figura 43 <i>Recepción de variables en la API</i>	90
Figura 44 <i>Interfaz de usuario, plataforma web Thinger.io</i>	91
Figura 45 <i>Interfaz de usuario, aplicación móvil Android</i>	91
Figura 46 <i>Base de datos</i>	92
Figura 47 <i>Alarmas, notificaciones para temperaturas menores a 4°C</i>	92
Figura 48 <i>Diagrama de flujo del algoritmo del nodo 1</i>	93
Figura 49 <i>Diagrama de flujo del algoritmo del nodo 2</i>	94
Figura 50 <i>Diagrama de flujo del algoritmo del nodo 3</i>	95
Figura 51 <i>Diagrama de flujo del algoritmo del módulo coordinador central</i>	96

Figura 52 <i>Diagrama de flujo del entorno virtual</i>	100
Figura 53 <i>Elementos del sistema de realidad virtual</i>	100
Figura 54 <i>Inmersión Virtual con Oculus Quest 2</i>	101
Figura 55 <i>Zona de manipulación y seguridad</i>	101
Figura 56 <i>Integración del entorno virtual con el dispositivo de inmersión</i>	102
Figura 57 <i>Diseño del entorno de Realidad Virtual</i>	103
Figura 58 <i>Diseño del algoritmo del entorno de realidad virtual</i>	105
Figura 59 <i>Esquema general del entorno virtual</i>	107
Figura 60 <i>Configuración del banco de baterías</i>	110
Figura 61 <i>Inclinación del Panel Solar</i>	111
Figura 62 <i>Panel Solar 60 celdas</i>	111
Figura 63 <i>Controlador de carga solar</i>	112
Figura 64 <i>Batería de ciclo profundo</i>	113
Figura 65 <i>Esquema del sistema de bombeo solar</i>	114
Figura 66 <i>Distribución de aspersores</i>	114
Figura 67 <i>Despliegue del nodo 1</i>	115
Figura 68 <i>Despliegue del nodo 2</i>	116
Figura 69 <i>Orientación del nodo 2</i>	116
Figura 70 <i>Despliegue del nodo 3</i>	117
Figura 71 <i>Implementación del módulo coordinador central</i>	117
Figura 72 <i>Interfaz de usuario en plataforma Thinger.io</i>	118
Figura 73 <i>Notificaciones de alerta temprana</i>	118
Figura 74 <i>Oculus Quest 2, dispositivo de inmersión para el entorno de Realidad Virtual</i>	119
Figura 75 <i>Interfaz de Realidad Virtual</i>	119
Figura 76 <i>Virtualización de la planta de papas en condiciones normales</i>	120
Figura 77 <i>Virtualización de la planta de papas en condiciones poco favorables</i>	120

Figura 78 <i>Instalación de panel solar</i>	121
Figura 79 <i>Controlador de carga solar</i>	121
Figura 80 <i>Funcionamiento del sistema de riego</i>	122
Figura 81 <i>Sinergia del sistema de agricultura inteligente</i>	122
Figura 82 <i>Área de cultivo: red de sensores</i>	124
Figura 83 <i>Arquitectura de activación automática</i>	129
Figura 84 <i>Comportamiento climático: 5 de julio</i>	134
Figura 85 <i>Comportamiento climático: 6 de julio</i>	134
Figura 86 <i>Radiación UV del 24 de junio de 2021</i>	137
Figura 87 <i>Área de cobertura del aspersor sobre el cultivo</i>	138

Lista de abreviaturas

LPWAN	Redes de área amplia de bajo consumo
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
LoRa	Largo alcance
UV	Ultravioleta
IoT	Internet de las cosas
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
MAGAP	Ministerio de Agricultura y Ganadería
VR	Realidad Virtual
PIB	Producto Interno Bruto
SMS	Mensaje Corto de Texto
GPRS	Servicio General de Paquetes Vía Radio
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación
CONGOPE	Consortio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador
Gateway	Módulo coordinador central

Resumen

Este trabajo, presenta un sistema de agricultura inteligente para minimizar el estrés abiótico por bajas temperaturas en los cultivos de papa INIAP-Suprema, basado en la tecnología LoRa. El sistema consta de nodos finales que recopilan los datos de las variables de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y radiación UV por medio de una red de sensores, los datos son transmitidos al módulo coordinador central, el cual los utiliza para controlar la bomba del sistema de riego por aspersión a través del nodo de control ubicado a nivel de campo. Para el funcionamiento de la bomba del sistema de riego se implementa una planta de energía eléctrica con paneles solares. La información de las variables que llegan al módulo coordinador central se envía a una computadora de supervisión por medio de comunicación serial hacia el entorno de Realidad Virtual, en el cual, se recrea el sistema implementado para monitorear las variables climáticas del cultivo y también se dispone de una virtualización con la capacidad de modificar los parámetros de cultivo para determinar nuevas condiciones de crecimiento. Igualmente, del Gateway se transmite los datos por la red IP utilizando el módulo WiFi integrado hacia la plataforma IoT Thinger.io, en donde se almacena cada una de las variables de los sensores, se dispone de una interfaz gráfica amigable para el usuario y alarmas de alerta temprana para informar al agricultor cuando exista bajas temperaturas. Finalmente, presentamos algunos resultados para evaluar el desempeño del sistema.

Palabras Clave:

- **AGRICULTURA INTELIGENTE**
- **REALIDAD VIRTUAL**
- **RED DE COMUNICACIÓN LORA**
- **PAPAS-ESTRÉS ABIÓTICO**
- **ENERGÍA SOLAR RENOVABLE**

Abstract

This work presents an intelligent agriculture system to minimize abiotic stress due to low temperatures in INIAP-Suprema potato crops, based on LoRa technology. The system consists of end nodes that collect the data of the variables of temperature, relative humidity, soil humidity and UV radiation through a network of sensors, the data is transmitted to the central coordinator module, which uses them to control the pump. of the sprinkler irrigation system through the control node located at the field level. For the operation of the irrigation system pump, an electric power plant with solar panels is implemented. The information of the variables that arrive at the central coordinator module is sent to a supervision computer through serial communication to the Virtual Reality environment, in which the implemented system is recreated to monitor the climatic variables of the crop and also has of a virtualization with the ability to modify the growing parameters to determine new growing conditions. Likewise, from the Gateway, the data is transmitted through the IP network using the integrated WiFi module to the IoT Thinger.io platform, where each of the sensor variables is stored, a user-friendly graphical interface and alarms are available. early warning to inform the farmer when there are low temperatures. Finally, we present some results to evaluate the performance of the system.

Key Words:

- **SMART AGRICULTURE**
- **VIRTUAL REALITY**
- **LORA COMMUNICATION NETWORK**
- **POTATOES-ABIOTIC STRESS**
- **RENEWABLE SOLAR ENERGY**

Capítulo I

1. Definición del Proyecto

1.1. Antecedentes

Hace alrededor de 10.000 años el hombre comenzó a cultivar la tierra (Vitale, 1983). Inicialmente usó herramientas rudimentarias como palos y huesos que luego evolucionaron a picos y azadones, se descubrió el sistema de riego y que los cultivos crecían mejor si se sembraban en línea creando surcos, dando la posibilidad de cultivar en terrenos que se creía no eran adecuados (Rivera Erazo, 2012).

Uno de los inconvenientes al que se ha enfrentado el agricultor es el clima, que no permite el crecimiento óptimo y homogéneo de los cultivos, generando hambrunas en algunas partes del planeta y la pérdida de cultivos, así como, las sequías, las bajas temperaturas que se experimentan en las madrugadas causando el estrés abiótico en los cultivos (Panettieri, 1997).

Según la (FAO, 2020). “Advierte que el calentamiento global y las actividades humanas son las principales causantes de las pérdidas de hasta el 40% de los cultivos en todo el mundo, un porcentaje que puede traducirse en 284 mil millones de dólares anuales perdidos”.

El (MAGAP, 2019) manifiesta que: los agricultores son los que suministran cada día productos para la alimentación y exportación, por lo tanto, son fuente de ingreso de divisas para la economía ecuatoriana, este sector aporta con el 8% al PIB. Los agricultores también generan fuentes de empleo en el sector rural, generado más de 2,2 millones de trabajos.

En la actualidad existen nuevas soluciones tecnológicas para el desarrollo agrícola (Popović et al., 2017). El IoT ofrece una gran variedad de aplicaciones en el ámbito de la alimentación y la agricultura, especialmente en vista de los desafíos sociales y ambientales que enfrenta este sector (Brewster et al., 2017). Son dispositivos que permiten monitorear

diferentes variables por medio de sensores que realizan el proceso de toma de datos en tiempo real en diferentes ambientes, ya sean invernaderos o a campo abierto, lo que facilita la toma de decisiones para mejorar y planificar los procesos de cultivos (Ossa, 2017).

Hay algunos proyectos como, un sistema de monitoreo remoto, que recopila datos en tiempo real del entorno de producción agrícola, para enviar alertas a través de un SMS (Patil et al., 2016). Diseños que se basan en estaciones meteorológicas, que proporcionan a los agricultores un medio para automatizar sus cultivos (riego, fertilización, cosecha) (Math et al., 2018). También se encuentran propuestas como un sistema de agricultura inteligente basado en GPRS, el cual requiere del pago de la banda de frecuencia (Li et al., 2011). Para lo cual proponen un sistema inteligente basado en la tecnología Zigbee, que resuelve el problema del pago por uso del espectro de frecuencia. Sin embargo, debido a la corta distancia de transmisión de la tecnología Zigbee, no puede tener un desarrollo a gran escala (Sahitya et al., 2017). En la actualidad existen desarrollos de plataformas inteligentes de servicios agrícolas que se basan en la tecnología de comunicación LPWAN con la finalidad de reducir el problema de cobertura, uso de frecuencia y ahorro de energía (Ma et al., 2018).

En comparación con la comunicación inalámbrica tradicional, LPWAN tiene las ventajas de una larga distancia de transmisión, baja potencia de consumo, bajo costo y gran capacidad de cobertura, actualmente LPWAN incluye LoRa, SigFox, LTE-M, NB-IOT (Hernandez et al., 2017). En comparación con sus similares, LoRa es más abierto, flexible y personalizado (Zhang et al., 2018).

Para visualizar, controlar, configurar y obtener reportes de diferentes dispositivos con sensores dispuestos en la finca, se requiere una interfaz de usuario final, es importante porque hoy en día, toda la información debe ser accesible desde cualquier lugar y en cualquier momento (Vu et al., 2018). Por lo tanto, el teléfono inteligente, el computador y la tablet, son herramientas con la cual el agricultor los opera mediante una interfaz gráfica de usuario (Rachmani et al., 2018). También se ha venido desarrollando investigaciones y

aplicaciones de Realidad Virtual en la agricultura, que explora nuevas formas de estudiar y analizar los cultivos con técnicas de reconstrucción tridimensional (Li H., 2007). Basado en la aplicación de tecnología de VR y los recursos de información multimedia de cultivos, se utilizan para la educación interactiva con la cual los agricultores y los jóvenes están más dispuestos a aceptar, comprender y dominar fácilmente el conocimiento de la agricultura (Yu et al., 2009).

1.2. Líneas de Investigación

- Automática y control
- Tecnologías de Información y Comunicación

1.3. Sub Líneas de Investigación

- Comunicaciones inalámbricas
- Realidad virtual
- Fuentes alternativas

1.4. Área de Influencia

- Producción agrícola en la Región Andina del Ecuador

1.5. Planteamiento del Problema

La producción agrícola representa un sector estratégico dentro de la economía del país por lo que se debe extraer todo su potencial. Para ello, monitorear eficientemente los cultivos puede aumentar significativamente la producción. Sin embargo, la implementación de elementos tecnológicos, aumentan los costos operativos y de mantenimiento, excediendo en muchas ocasiones lo que los pequeños agricultores pueden invertir (Borrero, 2018).

Ecuador al ser un país con producción agrícola en lugares con una altura por encima de 2500 metros sobre el nivel del mar, las heladas son frecuentes causando así el estrés abiótico por bajas temperaturas. Según datos del INAMHI en Ecuador se tiene 2,4 millones

de pobladores que están expuestos a este fenómeno, el cual es equivalente a 25000 kilómetros cuadrados de superficie agropecuaria expuesta a heladas.

El Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Agricultura del Ecuador, afirma que el 50% de los suelos del país se encuentran en procesos de degradación, generando repercusiones importantes, no solo respecto a la sostenibilidad ambiental del territorio, sino también sobre los medios de vida de los sectores más pobres del país, cuya subsistencia depende de la agricultura.

Es necesario desarrollar herramientas que permitan tener un monitoreo constante de las variables más relevantes de un cultivo con el fin de incorporar los avances tecnológicos a la sostenibilidad de la producción agraria (Fonseca, 2010).

Según un estudio realizado por la Universidad de los Andes, uno de los mayores inconvenientes que se observa a la hora de realizar el monitoreo de las variables de los cultivos se encuentra en la forma de la transmisión y recepción de los datos, debido a la baja efectividad en presencia de lluvia y obstáculos físicos que deterioran la señal (Briceño, 2005).

Uno de los inconvenientes que enfrenta el sector agrícola es la migración, el relevo generacional y el poco interés de los jóvenes en la agricultura, por lo que uno de las alternativas para ganar interés es la creación de entornos virtuales de los sistemas agrícolas que pretenden motivar y familiarizar a los jóvenes sobre la agricultura.

Con las herramientas tecnológicas y las necesidades de los agricultores, se requiere que los cultivos puedan ser monitoreados y recopilar datos de manera periódica para transmitirlos a una plataforma IoT. Al encontrarse en la plataforma IoT, el usuario puede compartir la información y analizarla al mismo tiempo. Para que la información de las variables llegue a la estación central remota, se utilizan dispositivos de comunicación de largo alcance ya que los campos se encuentran en áreas de baja cobertura de datos.

1.6. Trabajos Relacionados

En función de la investigación previa se pueden identificar los siguientes trabajos relacionados, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Trabajos Relacionados

No	Artículo / Proyecto	Autor	Año	Descripción
1	Diseño de una solución basada en el internet de las cosas (IoT) empleando LoRaWAN para el monitoreo de cultivos agrícolas en Perú.	Aguilar Zavaleta, S.	2020	Tiene por finalidad definir el diseño de una solución sustentada en el Internet de las Cosas (IoT) utilizando la tecnología LoRaWAN para incrementar los indicadores de supervisión y control de los parámetros de producción de los cultivos agrícolas en el Perú. Se define la arquitectura de red, características técnicas de los sensores agrícolas, circuito de control de riego, equipamiento de comunicaciones y servicios en la nube.
2	Prototipo de solución IoT con tecnología Lora en monitoreo de cultivos agrícolas	Triana Useche, J. C., & Rodriguez Leguizamo, R. E.	2018	Desarrolla un prototipo de solución IoT con tecnologías "LoRa", para conocer las variables físicas que afectan directamente al proceso de un cultivo a través de un aplicativo web. La adquisición de datos provenientes de los sensores (temperatura, humedad, radiación y Ph) envía los datos a través de comunicación LoRa hacia el respectivo Gateway (concentrador). La información que se encuentra en cada canal se enlaza a través de un "API key".
3	Diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de cultivos nativos utilizando Internet del Todo y redes FOG.	Palacios Frisancho, G.	2017	Mediante la implementación de una red de internet de las cosas realiza un monitoreo de factores climáticos, temperatura, humedad en los procesos de cultivo y los almacena en la nube, de manera que los cuidados sean aplicados en los momentos correctos, logrando así un gran ahorro y una mejora en el producto final.

No	Artículo / Proyecto	Autor	Año	Descripción
4	Smart Agriculture Using Internet of Things	Mat, I., Kassim, M. R. M., Harun, A. N., & Yusoff, I. M.	2018	En este artículo, se presenta el hardware y software del IoT para agricultura inteligente, crea un sistema para monitorear el cultivo con la ayuda de sensores (luz, humedad, temperatura, humedad del suelo) y automatiza el sistema de riego. Los granjeros monitorean las condiciones del campo de forma remota.
5	Smart Farm Monitoring Using LoRa Enabled IoT	Kodali, R. K., Yerroju, S., & Sahu, S.	2018	Este modelo utiliza la comunicación LoRa para enviar datos del sensor como temperatura (°C), humedad (%) y humedad del suelo (%) desde el nodo transmisor al nodo receptor. El nodo receptor que está habilitado para Wi-Fi usa servicios MQTT para monitorear los datos en la plataforma IBM Watson IoT y para almacenar los datos en el servicio IBM Cloud DB.
6	Design and Implementation of Smart Irrigation System Based on LoRa	Zhao, W., Lin, S., Han, J., Xu, R., & Hou, L.	2017	Propone un sistema de riego inteligente basado en LoRa. En este sistema, el nodo de riego se compone principalmente con un módulo de comunicación LoRa, válvula solenoide y un generador hidroeléctrico. El sistema se puede controlar de forma remota mediante aplicaciones móviles. Los resultados experimentales muestran, la distancia de transmisión y el consumo de energía en el sistema.

1.7. Justificación, Importancia y Alcance del Proyecto

Ecuador al ser un país agrícola, representa un sector estratégico dentro de la economía, aporta con el 8% al PIB y genera más de 2,2 millones de trabajos en el sector rural (MAGAP, 2019).

El país cuenta con territorio interandino de aproximadamente 25000 kilómetros cuadrados, con una altitud de 2500 metros sobre el nivel del mar (INAMHI, 2009). Donde

uno de los inconvenientes al que se enfrentan los agricultores es el clima, como las bajas temperaturas que se experimentan en las madrugadas en algunos meses del año causando heladas por ende el estrés abiótico, que no permite el crecimiento homogéneo, en ocasiones generando baja productividad o pérdidas en los cultivos.

Uno de los métodos recomendados según la (FAO, 2010) para la protección y prevención de heladas, es el sistema de riego por aspersión, ya que, se puede focalizar de mejor manera y así minimizar el estrés abiótico cuando hay bajas temperaturas.

Es importante mejorar la sustentabilidad agrícola, económica y social, así como la producción, por ello la tecnología con base en el internet de las cosas apunta a una agricultura inteligente que permitirá al productor tener dispositivos conectados formando una red de sensores y así enterarse del estado de su cultivo en tiempo real de forma sencilla, aumentando así la probabilidad de tener menos pérdidas agrícolas.

Con la implementación de la red de sensores los agricultores podrán disponer de información de sus cultivos con la finalidad de minimizar el estrés abiótico por bajas temperaturas, mediante la recolección de datos, todo esto se traduce en una reducción de costos y una mejora en la sustentabilidad de los cultivos.

También es imprescindible no olvidar que la población mundial no deja de crecer, y la continuidad de la producción no puede detenerse mediante la innovación tecnológica, a la vez que mejoramos los medios de subsistencia del sector rural.

Para alcanzar este propósito en el que convergen diferentes factores tecnológicos que incluyen la medición de variables climáticas presentes en las zonas de producción como la temperatura, humedad, radiación solar, con la comunicación inalámbrica y la visualización de datos, se realiza un sistema de agricultura inteligente con tecnología de comunicación LoRa. Los datos obtenidos proporcionan variables como la temperatura que causan el estrés abiótico al cultivo, cuando exceden los rangos normales.

Para aprovechar el recurso solar, se implementa una planta de energía eléctrica con paneles solares para el funcionamiento de la bomba del sistema de riego, para una siembra de 200 metros cuadrados.

Uno de los modos de operación del sistema, será por medio del desarrollo de una interfaz en la plataforma IoT Thinger.io, que recopila, visualiza y almacena los datos, que los dispositivos receptan por medio de los sensores.

En el entorno virtual se presenta un escenario interactivo y amigable del cultivo de papas que se monitorea con la red de sensores instalados en el campo y se controla el sistema de riego por medio del módulo coordinador central.

Además, se recrea un entorno virtual con la capacidad de modificar diferentes parámetros que afectan al desarrollo de la producción agrícola, como son el tipo de suelo, tipo de semilla y variables climáticas, centrandose en el cultivo de papas “INIAP-Suprema”, generando un ambiente simulado de casos hipotéticos y sus consecuencias en el crecimiento de la planta, evidenciando visualmente que sucedería en el desarrollo del cultivo.

Estas herramientas permitirán tener una ventaja competitiva para practicar y a su vez generar interés por la agricultura dándole un nuevo enfoque tecnológico.

También permiten generar un equilibrio en las necesidades que tiene el agricultor para mitigar el estrés abiótico por bajas temperaturas y fomentar prácticas inteligentes para mejorar la sustentabilidad de los cultivos.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo General

Implementar un sistema de agricultura inteligente con entorno de Realidad Virtual mediante el uso de tecnología LoRa orientado a minimizar el estrés abiótico por bajas temperaturas en el cultivo de papas.

1.8.2. *Objetivos Específicos*

- Diseñar una red de sensores para la medición de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, radiación ultravioleta y un nodo actuador mediante comunicación con tecnología LoRa.
- Diseñar un módulo coordinador central para la comunicación entre la red de sensores, plataforma IoT y con el computador para el entorno de Realidad Virtual.
- Diseñar una planta de energía eléctrica mediante paneles solares para el funcionamiento de una bomba de 1/2 hp.
- Implementar la red de sensores para medición de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, radiación ultravioleta.
- Implementar un módulo coordinador central para la comunicación entre la red de sensores, plataforma IoT y con el computador para el entorno de Realidad Virtual.
- Implementar una interfaz gráfica de usuario en una plataforma IoT libre.
- Implementar en un entorno virtual el comportamiento simulado del sistema, con la capacidad de modificar los parámetros y determinar nuevas condiciones de crecimiento.
- Implementar una planta de energía eléctrica con paneles solares para el funcionamiento de una bomba de 1/2 hp, para el sistema de riego.

1.9. **Hipótesis de Investigación**

La implementación del sistema de agricultura inteligente permitirá minimizar el estrés abiótico por bajas temperaturas en cultivos de papas.

1.10. **Categorización de las Variables de Investigación**

En la hipótesis planteada se identifican dos variables:

- **Variable Independiente:** La implementación del sistema de agricultura inteligente.
- **Variable Dependiente:** El estrés abiótico por bajas temperaturas en cultivos de papas.

La operacionalización de las variables se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Operacionalización de las Variables

Variables	Tipo	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
La implementación del sistema de agricultura inteligente	Independiente	La agricultura inteligente representa la aplicación de Tecnologías de la Informática y Comunicación (TIC) en el proceso de cultivo como en la agricultura de precisión, el Internet de las cosas IoT, la utilización de sensores y actuadores, sistemas de geoposicionamiento, Big Data, drones, robots, etc.	El internet de las cosas en la agricultura por medio de dispositivos inalámbricos con sensores que recolectan los datos y los envía hacia una plataforma IoT y a un entorno virtual, donde se visualiza, así como para realizar un proceso de control de actuadores. Con el fin de mejorar, prevenir y controlar los cultivos agrícolas.	-Costo de Implementación. -Facilidad de implementación.	- Porcentaje de costo de implementación. -Índice de facilidad de implementación.
El estrés abiótico por bajas temperaturas en cultivos de papas	Dependiente	El estrés abiótico o físico, es el impacto negativo de los factores no vivos en los organismos vivos en un entorno específico. La variable no viva debe influir en el medio ambiente más allá de su rango normal de variación para afectar adversamente el desempeño del cultivo.	El estrés abiótico tiene un impacto negativo para la productividad y supervivencia de los principales cultivos agrícolas. Debido al cambio climático que ocasiona la sequía y temperaturas extremas.	- Temperatura - Humedad relativa. - Humedad del suelo. - Radiación ultravioleta	-Temperaturas mínimas. -Humedad relativa y suelo óptimo. -Índice máximos de radiación ultravioleta

1.11. Marco Teórico Referencial

1.11.1. Marco Legal

- **Constitución de la República del Ecuador**, (Registro Oficial No. 449, 20-octubre - 2008).

Art. 281.- La soberanía alimentaria constituye un objetivo estratégico y una obligación del Estado para garantizar que las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades alcancen la autosuficiencia de alimentos sanos y apropiados de forma permanente.

Para ello, será responsabilidad del Estado:

Numeral 1. Impulsar la producción, transformación agroalimentaria y pesquera de las pequeñas y medianas unidades de producción, comunitarias y de la economía social y solidaria.

Numeral 3. Fortalecer la diversificación y la introducción de tecnologías ecológicas y orgánicas en la producción agropecuaria.

Numeral 8. Asegurar el desarrollo de la investigación científica y de la innovación tecnológica apropiada para garantizar la soberanía alimentaria.

Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

- **Resolución ARCOTEL-2018-0661**, (Registro Oficial No. 545, 18-septiembre - 2018)

En base, al numeral 1 del artículo 17 de la Carta Magna, ordena que el Estado en su tarea de fomentar la pluralidad y diversidad en la comunicación garantizará el acceso a bandas libres para la explotación de redes inalámbricas, observando para ello el interés colectivo.

Resuelve:

Los detalles para aplicaciones de equipos Industriales, Científicos y Médicos (ICM), adoptadas de la Recomendación UIT-R SM.1056-1, como equipos de calentamiento por

inducción, equipos de caldeo dieléctrico por RF, equipos médicos, equipos de microondas, equipos varios, equipos científicos y de laboratorio.

En la Tabla 3, se puede ver las bandas de uso libre, salvo que en la norma técnica se indique lo contrario.

Tabla 3

Límites específicos para transmisores intencionales

Banda de Frecuencias	Tipo de utilización	Límite de emisión
902-928 MHz	Transmisiones periódicas	5 000 $\mu V/m$ a 3 m
	Señales intermitentes de control	12 500 $\mu V/m$ a 3 m
2.4 GHz	Transmisiones periódicas	5 000 $\mu V/m$ a 3 m

Nota. Adaptado de límites específicos para transmisores intencionales, de Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (Registro Oficial No. 545, 18-septiembre - 2018).

1.11.2. Marco Conceptual

Los siguientes conceptos sintetizan los conceptos fundamentales de las principales áreas de estudio del proyecto:

- **Agricultura inteligente:** es un sistema de cultivo de alimentos de forma limpia y sostenible para las masas. Es la aplicación de las TIC en la agricultura (Mat et al., 2018).
- **Internet de las Cosas:** es un concepto que hace referencia a la interconexión de dispositivos físicos que reciben y transfieren datos a través del Internet sin la intervención humana (Bahamonde Chicaiza, 2020).
- **Agricultura de precisión:** es aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar exacto. Es el uso de la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente dentro de un lote (García et al., 2008).

- **Tecnología de Información:** es la aplicación de ordenadores y equipos de telecomunicación para almacenar, recuperar, transmitir y manipular datos, con frecuencia utilizado en el contexto de los negocios u otras empresas (de la Torre León et al., 2016).
- **Realidad Virtual:** se refiere al uso de una simulación del entorno generada por computadora, y a través de una variedad de equipos especiales permite que el usuario ingrese al entorno creado. La tecnología posibilita a los usuarios el utilizar las habilidades naturales de los objetos virtuales para inspeccionar u operar, mientras proporciona percepción visual, auditiva, táctil de manera natural e intuitiva del tiempo real (Yu et al., 2010).
- **Comunicación inalámbrica:** La comunicación inalámbrica o sin cables es aquella en la que extremos de la comunicación (emisor/receptor) no se encuentran unidos por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio (Ugsha Guanotasig et al., 2013).
- **LoRa:** LoRa es una tecnología inalámbrica basada en un sistema de radio frecuencia que da origen al protocolo LoraWAN (Chiriboga Torres, 2020).
- **Estrés abiótico:** se refiere a los factores ambientales que alteran los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (Taiz et al., 2010).
- **Energía solar fotovoltaica:** es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica (Wikipedia, 2021).

1.12. Diseño de la Investigación (Materiales y Métodos)

El presente estudio se basa en investigación aplicada, enfocado a resolver un problema práctico del ámbito agrícola, para lo cual se referencia datos de información básica de otros autores. Debido a la necesidad latente de los agricultores por disponer de herramientas tecnológicas que les ayude a mejorar sus cultivos se opta por la

implementación, para resolver la problemática se propone una hipótesis en base a la implementación y al análisis del fenómeno en estudio. La investigación finaliza con la verificación de la hipótesis en base a pruebas en campo.

La secuencia de investigación se desarrolló como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Matriz de diseño de investigación

Objetivo Específico	Técnica	Instrumentos/Medios	Indicadores
Diseñar una red de sensores para la medición de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, radiación ultravioleta y un nodo actuador mediante comunicación con tecnología LoRa.	Investigación aplicada.	Computador/Internet Software Proteus. IDE Arduino	Posibilidad de modificación de algoritmo de comunicación. Capacidad de conectividad con el Gateway.
Diseñar módulo coordinador central para la comunicación entre la red de sensores, plataforma IoT y con el computador para el entorno de Realidad Virtual.	Investigación aplicada.	Computador/Internet Software Proteus. IDE Arduino	Facilidad del diseño electrónico para manufacturar. Capacidad de conectividad con los nodos finales.
Diseñar una planta de energía eléctrica mediante paneles solares para el funcionamiento de una bomba de 1/2 hp.	Investigación aplicada.	Computador/Internet Software Matlab.	Facilidad de dimensionamiento para generación eléctrica. Capacidad de generación eléctrica.

Objetivo Específico	Técnica	Instrumentos/Medios	Indicadores
Implementar la red de sensores para medición de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, radiación ultravioleta.	Investigación aplicada. Investigación experimental.	Módulos ESP32 con chip LoRa Sensores humedad, temperatura, radiación UV. Contactores/Relés. Baterías.	Alcance de comunicación inalámbrica con LoRa. Sencillez de implementación. Tiempo de funcionamiento de los nodos finales. Capacidad de monitoreo de las variables climáticas.
Implementar módulo coordinador central para la comunicación entre la red de sensores, plataforma IoT y con el computador para el entorno de Realidad Virtual.	Investigación aplicada. Investigación experimental.	Módulo ESP32 Módulos ESP32 con chip LoRa Adaptador de energía	Capacidad de comunicación simultánea, con plataforma IoT y entorno virtual.
Implementar una interfaz gráfica de usuario en una plataforma IoT libre.	Investigación aplicada.	Computador/Internet Smartphone Plataforma IoT Thinger.io	Sencillez del manejo de la interfaz gráfica de usuario.
Implementar en un entorno virtual el comportamiento simulado del sistema, con la capacidad de modificar los parámetros y determinar nuevas condiciones de crecimiento.	Investigación aplicada. Investigación experimental.	Computador/Internet Software de animación 3D.	Realismo del contenido gráfico virtual. Facilidad en la modificación de los parámetros de cultivo en un ambiente simulado. Capacidad de visualizar diferentes escenarios dependiendo los parámetros.
Implementar una planta de energía eléctrica con paneles solares para el funcionamiento de una bomba de 1/2 hp, para el sistema de riego.	Investigación aplicada. Investigación experimental.	Computador/Internet Panel solar Hoja de datos de referencia. Controlador Regulador de Carga Convertor DC/AC Batería Bomba de agua	Capacidad de generación de voltaje y corriente con carga.

Capítulo II

2. Fundamentación Teórica

La agricultura en el siglo XXI se enfrenta a múltiples retos: tiene que producir más alimentos a fin de nutrir a una población creciente con una mano de obra menor, de modo que se debe adoptar métodos de producción más eficaces y adaptarse al cambio climático. (FAO, 2009)

2.1. La Demanda y la Producción de Alimentos

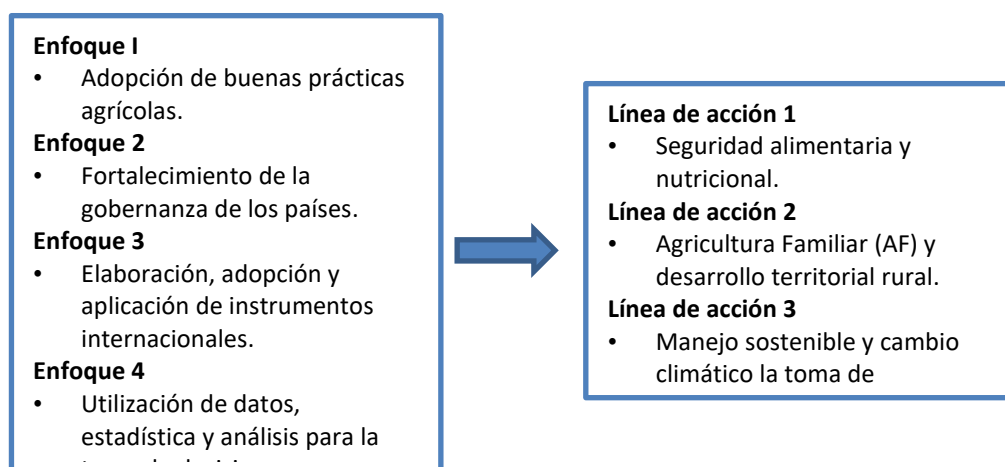
Las proyecciones muestran que para alimentar una población mundial de 9 100 millones de personas en 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70 % entre 2005 y 2050 (FAO, 2009).

En América Latina, la agricultura sigue siendo la principal actividad económica de los territorios rurales de la región (Penagos et al., 2019).

Las actividades de la (FAO, 2016) se orientan bajo cuatro enfoques, que contribuyen a tres líneas de acción regionales de América Latina y el Caribe (ALC). En la Figura 1, se muestran los enfoques de la FAO.

Figura 1

Los enfoques de la FAO



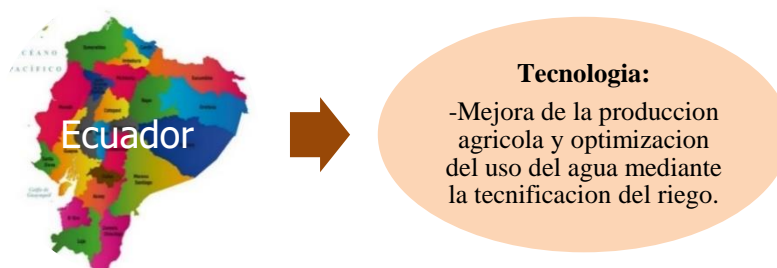
Nota. Adaptado de Los enfoques de la FAO (p.6), por FAO, 2016.

2.2. Producción Sostenible y Desarrollo Rural

En América Latina y el Caribe, según la (FAO, 2016) “ha trabajado en enfoques innovadores para aumentar la productividad de forma sostenible, con énfasis en la Agricultura Familiar y participación comunitaria” (p. 6). En la Figura 2, se muestra las buenas prácticas para la producción y conservación de recursos.

Figura 2

Prácticas para la producción y conservación de recursos naturales del Ecuador



Nota. Adaptado de Proyecto - Sistematización y difusión de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) (p.7), por FAO, 2016.

2.3. Descripción de la Agricultura en el Ecuador

Según datos del Banco Central del Ecuador (BCE), el PIB agrícola pasó de 15,4% en 2000 a 8,9% en 2013.

No obstante, hasta la actualidad, el sector agropecuario es uno de los principales motores de la economía ecuatoriana con enorme importancia económica y social.

Para el año 2013, según datos del BCE, la producción destinada a la agroindustria (ramas principales), es la actividad económica que más aporta al PIB global (14%). Genera empleo en el sector rural, cerca de 1'800.000 personas, equivalente al 62% de la población ocupada en dicho sector (MAGAP, 2016).

2.4. La Agricultura en la Provincia de Cotopaxi

Según el (MAGAP, 2016), cerca de 457 mil hectáreas de tierra son usados con fines agrícolas. Los cultivos principales son: maíz suave 623,7 ha; papa 615,6 ha; fréjol 181,0 ha;

Hortalizas 166,0 ha; cacao 602,44 ha; chocho 219,0 ha; mora 250,7 ha; quinua 795,9 ha; caña 396,0 ha. En la Tabla 5, se muestran los cultivos transitorios y permanentes.

Tabla 5

Principales productos por condición del cultivo, año 2013

Tipo	Cotopaxi
Permanentes	Caña de azúcar para azúcar, cacao, plátano, banano, orito, naranja, palmito, café, palma africana, tomate de árbol.
Transitorios	Maíz suave seco, papa, maíz suave choclo, cebada, maíz duro seco, cebolla blanca, chocho, yuca, fréjol, haba.

Nota. Adaptado de Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria ESPAC INEC 2013, por MAGAP, 2016.

En un 45% de los cultivos se usan métodos mecanizados y en un 55% aún se utilizan herramientas rudimentarias, se estima que en la provincia de Cotopaxi hay 457 mil hectáreas de tierra para uso agropecuario.

2.4.1. Agricultores

Para producir los alimentos, en la provincia de Cotopaxi se ocupan cerca de 94.687 agricultores, el número de productores en el sector rural tiende a disminuir cada año (MAGAP, 2016). En la Tabla 6, se aprecia los productores en el sector rural.

Tabla 6

Población ocupada en agricultura, ganadería, silvicultura y pesca

Zona 3	Años calendario						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
T. Zona 3	396.704	375.065	390.987	376.676	362.218	336.392	328.238
Cotopaxi	124.705	123.163	127.274	119.621	109.770	110.215	94.687
Tungurahua	110.010	105.006	107.074	104.739	105.831	93.516	79.413
Chimborazo	145.457	130.429	140.288	137.657	131.041	113.045	138.395
Pastaza	16.532	16.467	16.352	14.658	15.575	19.616	15.743

Nota. Si continúa el dramático descenso de productores rurales, al 2025 se habrá reducido significativamente, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria. Tomado de Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo INEC 2007-2013, MAGAP, 2016.

2.4.2. Demanda de Producción Agropecuario

Al 2025 en la provincia de Cotopaxi se estima que deberá alimentar a una población creciente, esto es, alrededor de 332.738 habitantes. En la Tabla 7, se ilustra la evolución de la población de la zona, en proyección de 2015 a 2025 (MAGAP, 2016).

Tabla 7

Proyecciones de población 2015-2025

Zona 3	Años calendario			
	2015	2017	2020	2025
Cotopaxi	313.639	318.139	323.506	332.738
Tungurahua	335.821	346.230	361.755	386.948
Chimborazo	292.309	295.705	300.075	308.811
Pastaza	55.719	58.768	63.458	60.379

Nota. Adaptado de Proyecciones de Población INEC 2000-2025, MAGAP,2016.

2.5. El Cultivo de Papa

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es el cuarto cultivo más importante a nivel mundial después del maíz, trigo y el arroz con 385 millones de toneladas de tubérculos producidos en 19,2 millones de hectáreas durante el año 2014 (Mastrocola et al., 2016).

En el Ecuador la papa es uno de los principales cultivos de la región andina, para el año 2014 se reportaron 35,468 ha cosechadas con una producción total de 443,357 toneladas, lo cual representa un rendimiento promedio de 12,5t/ha. El cultivo vincula a más de 82,000 productores; la producción está orientada principalmente hacia el mercado interno, (Devaux et al., 2010).

El cultivo de papa en el Ecuador se realiza en la zona interandina, en alturas comprendidas entre los 2,700 a 3,400 metros sobre el nivel del mar; se produce en las 10 provincias de la Sierra, las más representativas por el volumen de producción son en la zona Norte: Carchi y Pichincha; en la zona centro: Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar y Chimborazo y en la zona sur: Cañar y Azuay. La mayoría de los productores de papa (76%) son agricultores familiares con unidades de producción menores a las 5 has, (Devaux et al., 2010).

En nuestro país el INIAP reporta la existencia de más de 550 variedades nativas y más de 20 mejoradas como: Superchola, INIAP-Victoria, INIAP-Cecilia, INIAP-Natividad, INIAP-Yana shungo, INIAP-Puca shungo, INIAP-Fripapa, INIAP-Suprema e INIAP-Gabriela, por citar las más importantes, (Cuesta et al., 2014).

2.5.1. Variedad de Papa INIAP-Suprema

Según el (Montesdeoca et al., 2000), la papa INIAP-Suprema es una variedad para consumo en fresco. La forma del tubérculo es oblonga-alargada, color de piel blanca, con ojos superficiales bien distribuidos en el tubérculo, color de pulpa crema. INIAP-Suprema, bajo condiciones favorables produce rendimientos promedios de hasta 42.7 t/ha. La precocidad es otra característica de la variedad pues a altitudes de 2630 sobre el nivel del mar se obtiene la madurez a los 110 días y 120 días para la cosecha. La mayor ventaja de esta papa es la resistencia expresada a lancha (*Phytophthora infestans*).

2.5.2. Características Morfológicas

- **Plantas:** Vigorosas, desarrollo rápido, cubre bien el terreno. Tamaño medio, tallos en número de tres, color verde intenso, presencia de alas semidentadas, entrenudos cortos y manifiestos, ramificación secundaria en dos niveles.
- **Hojas:** Compuestas, imparipinnadas, color verde intenso, abiertas, con tricomas en el haz y en el envés. Tamaño grande. Tres pares de folíolos primarios unidos por un peciolulo, que se alternan con tres pares de hojuelas o peciolos secundarios. El folíolo terminal es mediano, asimétrico, acorazonado, y seudoestípulas medianas. Folíolos secundarios pequeños, asimétricos, peciolados, y un pequeño par de folíolos terciarios peciolados también (Montesdeoca et al., 2000).
- **Tallos:** suculentos, robustos, de color verde intenso, sin color secundario. En la inserción de la hoja con el tallo posee un par de hojuelas llamadas seudoestípulas que tienden a ser pequeñas.

- **Flores:** con cinco pétalos de color blanco y cinco sépalos verdes. Su floración es medianamente numerosa.
- **Fruto:** bayas medianas, ovalada redonda, de color verde intenso. La formación de bayas es moderada.
- **Tubérculos:** Forma oblonga alargada, piel de color crema, sin color secundario, pulpa crema pálida. Ojos medios a superficiales, bien distribuidos (Montesdeoca et al., 2000).

2.5.3. Características Agronómicas

En la Tabla 8, se presenta las características agronómicas de la papa INIAP-Suprema.

Tabla 8

Características agronómicas en localidades a 2.630 msnm y 14º C de temperatura

VARIABLES	
Zonas recomendadas	Especialmente para la sierra-centro del país (Tungurahua y Cotopaxi); sin embargo, se desarrolla bien en la zona Norte (Carchi).
Días a la floración	70*
Días a la cosecha	120 (Precoz)*
Hábito de crecimiento	Erecto
Tipo de planta	Andígena/Tuberosum
Enfermedades	Resistencia a Lancha
Rendimiento: kg/ planta	1.36
N.º de tubérculos por planta	8-13
N.º de tallos por planta	3
Clasificación de tubérculos (%)	
-Comercial	24.70
-Primera	36.01
-Segunda	31.99
-Tercera	5.0
-Fina	2.3
Rendimientos en campos de productores	30.6 t/ha.

Nota. Adaptado de Características agronómicas (p.3), por Montesdeoca et al., 2000.

2.6. El Estrés en las Plantas

El término estrés en el marco de la fisiología vegetal “refleja la magnitud de presión ambiental que fuerza al cambio en la fisiología de una planta” (Nilsen et al., 1996). También

se define al estrés como: “cualquier factor ambiental potencialmente desfavorable para los organismos vivos” (Lichtenthaler, 1996).

También (Lichtenthaler, 1996) distingue tres conceptos:

- **Estrés:** es el estado de una planta cuando se la somete a una fuerza
- **Tensión o esfuerzo:** es la respuesta de la planta al estrés antes que ocurra algún daño
- **Daño:** es el resultado de un estrés de tal intensidad que no puede ser compensado por la planta.

(Lambers et al., 1998), definen al estrés como “cualquier factor ambiental biótico o abiótico que reduce la tasa de algún proceso fisiológico (por ejemplo, crecimiento o fotosíntesis)”.

2.6.1. Tipos de Estrés

Existen variadas clasificaciones de los factores de estrés. En general, estos pueden ser clasificados en físicos, químicos y bióticos, siendo los dos primeros agrupados bajo el término de ‘estreses abióticos’. Entre los factores físicos se pueden mencionar el estrés por déficit o exceso de agua, altas-bajas temperaturas y radiación UV (Tambussi, 2005).

2.6.2. Factores Bióticos

Existe un rango bastante amplio de factores bióticos que afectan el desarrollo del cultivo de papa y que más pérdidas causan en el rendimiento, al igual que el deterioro de la calidad del producto, son causadas por: tizón tardío (*Phytophthora infestans*), pudrición seca (*Fusarium* spp), sarna (*Streptomyces scabies*), pie negro (*Pectobacterium*), costra negra (*Rizoctonia solani*) y roña (*Spongospora subterranea*) (Espinosa, 2017).

Las plagas que más afectan en la productividad de cultivo son: gusano blanco (*Premnotrypes vorax*), tres especies de polillas (*Phthorimaea operculella*, *Symmetrischema tangolias* y *Tecia solanivora*), mosca minadora (*Liriomyza* spp), pulgones (*Myzus persicae* y *Macrosiphum euphorbiae*), trips (*Frankliniella tuberosi*) y el nemátodo del quiste (*Globodera pallida*) (Montesdeoca et al., 2013).

Una planta que se ve afectada por estrés abiótico tiene como consecuencia más problemas para defenderse contra los agentes bióticos de plagas y enfermedades (Pérez, 2010).

2.6.3. Factores Abióticos

Los principales factores abióticos que afectan al cultivo de papa son el fotoperiodo, las sequías y la temperatura (Pérez, 2010).

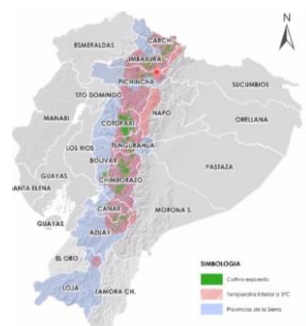
2.6.3.1. El Estrés por Bajas Temperaturas. Dado que las plantas son poiquilotermas (carece de mecanismos internos reguladores de la temperatura del cuerpo), las bajas temperaturas son un factor crítico en la distribución de las comunidades vegetales, en el crecimiento de importantes cultivos y productividad, como la papa y el maíz (Kratsch et al., 2000).

2.7. Cultivos en el Ecuador Expuestos a Descensos de Temperatura

El marco del Proyecto Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierra Rurales del Ministerio de Agricultura y el Instituto Espacial Ecuatoriano, manifiestan que, cerca de 340 mil hectáreas de cultivo se encuentran expuestas a descensos de temperatura inferiores a 3 °C (CONGOPE, 2021). En la Figura 3 y en la Tabla 9, se presenta los sectores expuestos a descensos de temperatura.

Figura 3

Cultivos expuestos a descensos de temperaturas



Nota. Adaptado de Sistema de alerta temprana frente a heladas a través del uso de sensores climáticos [Presentación], CONGOPE, 2021.

Tabla 9*Cultivos expuestos a descensos de temperaturas*

Provincia	Superficie (Ha)
Azuay	16490.73
Bolívar	30768.29
Cañar	12805.00
Carchi	21594.77
Chimborazo	92675.68
Cotopaxi	80591.06
Imbabura	32868.10
Loja	440.09
Pichincha	21487.61
Tungurahua	31248.56

Nota. Adaptado de Sistema de alerta temprana frente a heladas a través del uso de sensores climáticos [Presentación], CONGOPE, 2021.

2.7.1. Variación de la Temperatura Mínima

En el Ecuador la temperatura mínima absoluta varía desde $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los 17°C . Los descensos de temperatura menores a 3°C ocurren sobre todo en las zonas con una altura superior a los 2700 metros sobre el nivel del mar, es decir en el Callejón Interandino, siendo las provincias más afectadas: Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, Pichincha, Imbabura y Carchi. Por lo general este fenómeno se presenta durante las madrugadas (entre la 01:00 y las 06:00) (INAMHI, 2019).

2.7.2. Efectos de las Bajas Temperaturas en la Economía

Las bajas temperaturas registradas en la provincia de Cotopaxi afectan sembríos de las zonas agrícolas de los cantones Pujilí, Latacunga, Salcedo y Saquisilí. Las bajas temperaturas en horas de la noche y la madrugada provocan pérdidas en los cultivos de maíz, papas y frejol. Los pequeños agricultores calculan que por hectárea de cultivo de maíz pierden entre 1800 a 2000 dólares y en el de papas de 4500 a 5000 dólares. La mayoría de

agricultores no cuentan con seguro agrario por lo que la perdida la asumen ellos. Se calcula que cerca de 1000 hectáreas son las afectadas por las heladas en Cotopaxi. (Caicedo, 2017)

También en Cotopaxi, en septiembre del 2018 se perdieron 203 hectáreas de cultivos en las parroquias Pastocalle, Tanicuchi y Toacaso, ascendiendo a \$ 80.000 (MAGAP, 2018).

2.8. Heladas

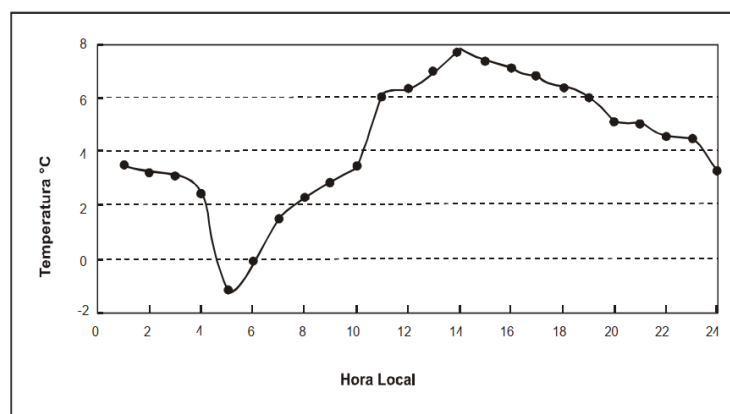
Las heladas constituyen un factor que atenta contra la productividad y rentabilidad de los cultivos.

2.8.1. Definición de Heladas

Consiste en la formación de hielo sobre las superficies, esto es ocasionado por el descenso de la temperatura y el enfriamiento del aire, lo que genera un cambio de estado del vapor de agua a hielo (FAO, 2010); en el ámbito meteorológico se establece que una helada empieza a suceder a una temperatura igual o menor a 0°C en una altura entre 1,25 y 2 metros sobre el nivel del suelo, no obstante, desde el concepto de la agricultura puede entenderse una helada específicamente como la temperatura a la cual los tejidos de la planta comienzan a sufrir daño (Estacio et al., 2020). Las heladas, se presenta por lo general en la madrugada o cuando está saliendo el Sol, ver la Figura 4.

Figura 4

Comportamiento horario de la temperatura



Nota. Adaptado de Comportamiento horario de la temperatura (p.3), por CENAPRED, 2001.

2.8.2. Clasificación de las Heladas por su Efecto Visual

Se tienen dos tipos de heladas: blanca y negra. La helada blanca se origina cuando estas masas de aire son húmedas; en cambio, cuando tienen poco contenido de vapor de agua, se forma la helada negra.

2.8.2.1. Helada Blanca. Las temperaturas son iguales o menores que 0°C, el aire alcanza la temperatura del punto de rocío y de inmediato el vapor de agua del aire pasa al estado sólido para formar hielo, forma capas de color blanco sobre la superficie de las plantas como se muestra en la Figura 5. (CENAPRED, 2001).

Figura 5

Helada blanca



Nota. Adaptado de Comportamiento horario de la temperatura (p.3), por CENAPRED, 2001.

2.8.2.2. Helada Negra. Se presenta cuando el aire tiene poco vapor de agua (humedad baja) y la temperatura del punto de rocío es inferior a 0° C; de modo que existe escasa condensación y nula formación de hielo sobre la planta. Sin embargo, los cultivos son dañados y al día siguiente las plantas presentan una coloración negra, por la congelación de la savia de las plantas o del agua de sus tejidos como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Helada negra



Nota. Adaptado de Qué diferencias existen entre las heladas blancas y negras y cómo prevenirlas [Fotografía], por INFOCAMPO, 2019, Metromedia.

2.8.3. Efectos de las Heladas

Los cultivos son vulnerables a la helada, cuando la temperatura del aire desciende hasta formar cristales de hielo en el interior de sus células durante cierto tiempo. El proceso de deterioro de las plantas depende del estado vegetativo en que se encuentre y de la especie a la que pertenece. A continuación, se describen algunos de estos efectos (CENAPRED, 2001).

- **Internos:** ruptura de las membranas de la célula por el crecimiento de cristales de hielo dentro del protoplasma (deshidratación).
- **Externos:** muerte de hojas y tallos tiernos, destrucción de un gran porcentaje de flores y frutos pequeños, e incluso la muerte total de la planta. La resistencia del cultivo a la helada depende de la etapa de desarrollo; ya que, es más resistente cuando se encuentra en el periodo de germinación, mientras que en la floración es mayor el daño que sufre.
- **Inmediatos:** sus efectos son la deshidratación y el rompimiento de la membrana.
- **Acumulativos:** si bien son causados por temperaturas bajas, no necesariamente a 0° C a lo largo de periodos prolongados, provocando así el efecto de deshidratación en un tiempo de tres a cuatro días. Comúnmente se manifiesta con la intoxicación de la planta por las sales minerales cuando el fenómeno se repite (CENAPRED, 2001).

2.8.4. Métodos para Cuantificar Daños por las Heladas

Según (Pino et al., 2016) en campo abierto comúnmente se evalúa el daño producido mediante metodologías que clasifican el porcentaje de plantas muertas, porcentaje de plantas recuperadas post-helada y el rendimiento por planta. Otra metodología utilizada para evaluar el efecto de las heladas es mediante escala visual, que permiten determinar un nivel de daño mediante observación y cuantificación del efecto producido (Vega et al., 1995). En la Tabla 10, se muestra los métodos de evaluación y en la Figura 7, se presenta la escala visual de daño causado.

Tabla 10

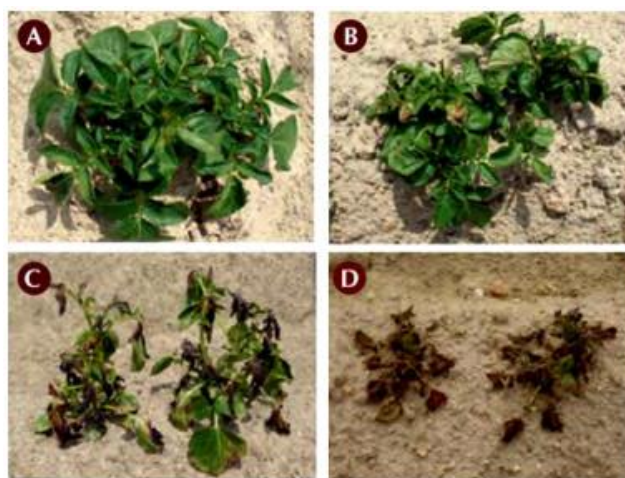
Distintos métodos para evaluar daños por heladas en papas

Método	Aclimatación	Descripción	Evaluaciones	Equipamiento
Helada directa en campo.	Natural	Se realiza en el campo, depende del clima y de la ocurrencia de heladas	- Daño visual de la hoja 5 días post helada - Porcentaje de plantas muertas - Porcentaje de plantas recuperadas - Rendimiento planta.	- Termómetro de suelo con dataloggers - Estación meteorológica.
Heladas simuladas en cámara de crecimiento controlada.	2°C durante dos semanas en cámara de crecimiento.	Se realiza en plantas contenidas en macetas. Post aclimatación, las plantas se someten a una tasa de enfriamiento de -1,0°C por hora.	- Daño visual de la hoja 5 días post helada - Porcentaje de plantas muertas - Porcentajes de plantas recuperadas - Rendimiento planta.	- Cámara simulación de heladas y cámara de aclimatación. - Fitotrones.
Termo estabilidad de la membrana, (Ion leakage Test).	2°C durante dos semanas en cámara de crecimiento.	Se realiza en plantas contenidas en macetas. Post aclimatación, discos de hojas se someten a una tasa de enfriamiento de -1,0°C por hora.	- LT50, temperatura al cual se produce un 50% de rompimiento de las células por bajas temperaturas. - % Pérdida de electrolitos.	- Cámara de aclimatación. - Baños refrigerados con circulación y control digital de temperaturas. - Conductivímetro.
Clorofila fluorescente.	Natural o a 2°C durante dos semanas en cámara de crecimiento.	Método indirecto post heladas, se evalúa en hojas expandidas y fisiológicamente activa.	Índice rendimiento cuántico máximo del PSII (Fv/Fm).	Fluorómetro.

Nota. Adaptado de Análisis comparativo entre distintos métodos para evaluar daños por heladas en papas [En línea], por Contreras Méndez, 2015.

Figura 7

Daño en plantas de papas afectadas por heladas 40 días después



Nota. A) sin daño o muy bajo. B) daño bajo (<25%). C) daño moderado (50%). D) daño severo (>75%). El daño fue registrado cinco días después de ocurrida la helada según el porcentaje de área foliar dañada. Tomado de Chang et al., 2014.

2.8.5. Frecuencia de Heladas

(Moreno et al., 2017), efectuó un análisis de la frecuencia de las heladas en base a los datos de la estación meteorológica de Rumipamba. En la Tabla 11, se presenta la ubicación de la estación meteorológica.

Tabla 11

Estaciones meteorológicas en la provincia de Cotopaxi

Cod. Estación	Nombre de la estación	Cantón	Elevación
M004	Rumipamba	Salcedo	2685 msnm

Nota. Adaptado de Estaciones Meteorológicas del área de estudio (p. 20), por Caicedo, 2017.

El período medio con heladas es de 194 días (entre julio y diciembre) y el período medio sin heladas es de 171 días (enero a junio), lo que nos indica que en especial los meses de noviembre y septiembre deben ser considerados críticos para el desarrollo de cultivos.

Estos datos corresponden a un estudio a una altitud de 2628 msnm. Según la Tabla 12, se observa que el 52,4% de las heladas se presentan como heladas suaves, el 23,2%

como heladas moderadas, el 13,8% como heladas fuertes, el 6,5% heladas muy fuertes, mientras que las heladas severas 3,3%. Igualmente, muestra que las heladas suaves y moderadas (75,6%) ocurren a lo largo de todo el período anual de heladas.

Tabla 12

Intensidad de heladas de la estación meteorológica de Rumipamba - Salcedo

Heladas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Frec.	%
Suaves	9	3	5	2	1	7	18	19	23	11	19	12	129	52,4
Moderadas	4		1	1	1	4	9	8	15	5	10	1	59	23,2
Fuertes			2		2	3	5	5	4	3	8	2	34	13,8
Muy fuertes						1	1	2	2	1	7	2	16	6,5
Severas							1				6	1	8	3,3
Total	13	3	8	3	4	15	34	34	44	20	50	18	246	100,0

Nota. Adaptado de Intensidad de heladas de la estación agrometeorológica de Rumipamba en Salcedo (p. 105), por Moreno et al., 2017.

2.8.6. Métodos de Protección Contra Heladas

Los métodos de protección contra heladas tienen como objetivo anular o minimizar los efectos de este fenómeno sobre los cultivos, contrarrestando los daños que producen directamente la muerte celular de las plantas. Existe una diversidad de métodos de protección contra heladas, pero la efectividad de su aplicación a cualquier clase de cultivo depende de varios factores como el tipo de helada para el cual fueron desarrollados, su adecuada aplicación, las características inherentes de cada especie de planta, la viabilidad tecnológica y económica específica de cada cultivo y su contexto (Estacio et al., 2020).

Dentro de los métodos de protección contra heladas se diferencian dos categorías principales, métodos de protección activos y métodos de protección pasivos, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Técnicas de protección activa y pasiva contra efectos de las heladas

Técnicas de protección pasiva	Técnicas de protección activa
Son las técnicas que se aplican antes de presentarse el fenómeno de la helada para evitar tener que necesitar una protección activa.	Son las técnicas que se aplican durante el momento del fenómeno helada para mitigar los efectos de las temperaturas bajo los 0°C.

Nota. Adaptado de Estacio et al., 2020.

Según la (FAO,2010), Los métodos pasivos son aquellos métodos que son puestos en marcha antes de que se forme la helada. Estos son de prevención los cuales por lo general son baratos, en cambio los métodos de protección activos son aquellos que se usan o se ponen en marcha en el momento en que se presenta el fenómeno de las heladas. Los métodos activos suelen ser más costosos que los pasivos, pero son en promedio más eficientes. En la Tabla 14, se presenta los diferentes métodos de protección contra heladas.

Tabla 14

Métodos de protección contra heladas, pasivos y activos

Pasivos	Activos
Emplazamiento de cultivos	Estufas
Drenaje de aire Frio	Ventiladores
Selección de plantas	Helicópteros
Poda Adecuada	Aspersores
Cobertura de plantas	Aislamiento con espuma
Evitar el laboreo del suelo	
Riego	
Control bacteriano	

Nota. Adaptado de Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía, por FAO,2010.

2.8.6.1. Técnicas de Protección Pasiva:

- **Selección de plantas**, consiste en escoger cultivos que por experiencia son resistentes a los efectos de las heladas o que su daño sea menor a comparación de otros cultivos.

- **Cobertura con árboles**, consiste en plantar intercaladamente plantas de mayor tamaño al del cultivo.
- **Riego**, este método suele usarse cuando en los suelos existen espacios de aire que inhiben la transferencia de calor y su almacenamiento (Estacio et al., 2020).

2.8.6.2. Técnicas de Protección Activa:

- **Estufas**, el uso de las estufas en la mitigación del efecto de las heladas es comúnmente usado en el mundo; consiste en poner estufas cerca de los sembríos para que proporcionen energía para aumentar la temperatura del ambiente haciendo que la temperatura no caiga a niveles que provoquen daños críticos a las plantas.
- **Ventiladores**, esta técnica consiste en instalar ventiladores de flujo horizontal cuyo propósito es empujar el aire horizontalmente para mezclar el aire más caliente de la parte superior con el aire frío alrededor de la superficie, sus costos para su uso son bajo, pero la inversión inicial es cara.
- **Los aspersores**, esta técnica se caracteriza por tener menor consumo de energía en comparación al resto, volviendo a aplicar el agua frecuentemente con el suficiente caudal para evitar que la temperatura del tejido de la planta baje a niveles dañinos (Estacio et al., 2020). La técnica de protección activa con aspersores se va implementar en el presente proyecto

Características:

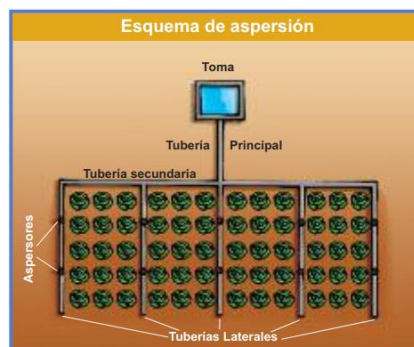
- La temperatura alrededor del suelo se mantiene favorable.
- Aumenta la conductividad térmica del suelo.
- Aumenta la evaporación desde el suelo
- Aumento de la capacidad de calor del suelo

2.8.6.3. Riego por Aspersión - Multiflujo. El agua sale como lluvia, para eso tiene que venir con presión por las tuberías. Si la fuente está 10 metros encima del terreno, funciona sola, si no se necesitan equipos de bombeo.

El agua baja por la tubería principal, de ahí pasa a las secundarias y de ahí a las laterales que tienen los aspersores, que son pitones que hacen que salga en forma de lluvia (MAGAP, 2014). En la Figura 8, se presenta un ejemplo de la disposición del riego por aspersión.

Figura 8

Riego por aspersión



Nota. Adaptado de Riego por aspersión (p. 6), por MAGAP, 2014.

Características:

- El riego por aspersión tiene un 85% de eficiencia ya que no se desperdicia. Lo que baja la eficiencia es el viento fuerte o mucho calor que evapora.
- Varios regantes (simultáneamente).
- Se reparten caudales menores.
- Cada siete días.
- Intensidad de aplicación baja
- Tiempo más prolongado de riego (CONGOPE, 2021).

2.9. Sistema de Agricultura Inteligente

La agricultura inteligente tiene por objetivo afrontar el reto que supone para la humanidad alimentar a los 9100 millones de personas que en el año 2050 poblarán la tierra,

un hecho que implica la producción de un 70 % más de alimentos entre 2005 y 2050 (Calvo., 2019).

Busca reducir y mejorar el uso de los recursos naturales mediante la aplicación práctica de tecnologías de información y datos. No involucra solo a las máquinas, sino a todas las operaciones agrícolas. Gracias a esto, los agricultores tienen la información necesaria para tomar decisiones informadas basadas en datos concretos y objetivos.

2.9.1. Parámetros de la Agricultura Inteligente

- **Productividad:** la Agricultura Inteligente propone aumentar de forma sostenible la productividad agrícola y los ingresos de cultivos, ganado y peces, sin tener un impacto negativo en el medio ambiente (Cerem Comunicación, 2017).
- **Adaptación:** presta especial atención a la protección que los ecosistemas proporcionan a los agricultores, esenciales para mantener la capacidad para adaptarse a los cambios climáticos.
- **Mitigación:** siempre que sea posible, la Agricultura Inteligente debe ayudar a reducir e incluso eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero (Cerem Comunicación, 2017)

2.9.2. Parámetros de la Agricultura Inteligente para la Industria

La agricultura inteligente es una metodología sostenible, concebida para gestionar los recursos naturales de manera eficaz y disminuir el impacto de esta actividad en el medio ambiente. (El Universo, 2019).

La inclusión de la industria 4.0 en la agricultura, permite que los datos sean tomados a través de los equipos y sistemas tecnológicos, para identificar y entender la necesidad del cultivo para evitar pérdidas de los agricultores.

La prevención y la adopción de buenas prácticas en la agricultura son la clave para la conservación del suelo. El uso de tecnologías modernas para la captura de datos y análisis de los mismos, (Big Data), permite de manera eficiente el monitoreo y predicción de eventos

que ayudan a tomar decisiones rápidas y oportunas para minimizar el impacto de las labores propias de la agricultura, en los suelos aptos para dicha actividad (El Universo, 2019).

2.9.3. Agricultura de Precisión.

Es una práctica que utiliza el análisis de datos recolectados, principalmente de una red de sensores para optimizar la gestión de una parcela. Es aplicar la cantidad correcta de recursos, en el momento adecuado y en el lugar exacto. (Fernández J. 2020).

2.9.4. El IoT en la Agricultura

El IoT en el sector de la agricultura, suponen una gran ayuda para su digitalización y mejora de la productividad agrícola. (App&Web, 2019).

Debido al aumento de la población, los agricultores encuentran grandes dificultades para producir el nivel exigido por el mercado, problema que se soluciona con medidas de IoT, que es un paso más en la interconectividad, de forma que no solo las personas se conectan a la red de redes.

El internet de las cosas en agricultura podría definirse de la misma manera, pero trasladándose a su aplicación en sistemas de producción o maquinaria agrícola. También se podría entender como una subcategoría del IoT industrial.

La aplicación del IoT a la agricultura supone un cambio en la manera de trabajar en los cultivos, con el objetivo de automatizar procesos, optimizar recursos, reducir gastos y aumentar la rentabilidad y la producción (IAT, 2020).

2.9.5. Ventajas de la Aplicación del IoT en Agricultura

- Permite a los agricultores dedicar más tiempo al estudio y mejora de los cultivos y reducir el que pasan sobre el propio terreno.
- Monitoriza de forma sencilla y en tiempo real el estado de los cultivos.
- Automatiza el trabajo en áreas rurales.
- Recoge y analiza datos que permiten aumentar la eficacia en la toma de decisiones.

- Mejora el aprovechamiento de los recursos, por ejemplo, abonos, fertilizantes o recursos hídricos.
- Reduce las emisiones contaminantes.
- Aumenta la seguridad de los procesos, evitando tareas arduas o peligrosas para los agricultores.
- Permite la aplicación de mecanismos efectivos para el control de plagas.
- Facilita la identificación anticipada de posibles riesgos para los cultivos.
- Mejora la logística.
- Aumenta la producción y la rentabilidad de los terrenos (IAT, 2020).


2.9.6. Tecnológicas del IoT en la Agricultura


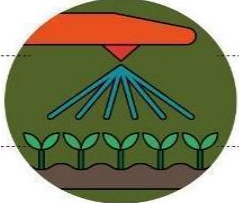
Permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones, está basada en la explotación de los datos tomados mediante el uso de sensores y el geoposicionamiento (El Blog del Grupo Fertiberia, 2017).

2.9.6.1. Etapas de las Tecnológicas del IoT en la Agricultura. Algunas de las soluciones y herramientas tecnológicas involucradas en cada etapa del proceso de agricultura 4.0, se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15

Etapas tecnológicas del IoT en la agricultura

Etapa	Definición
1. Recopilación de datos	<p data-bbox="874 1552 1321 1615">Medición remota de un gran número de datos en tiempo real.</p> 

Etapa	Definición
2. Análisis, proceso e interpretación de la información	<p>Manejo diferenciado de insumos y tareas agrícolas</p> 
3. Aplicación diferencial de insumos	<p>Permite explotar todo su potencial</p> 

Nota. Adaptado de Tecnologías de la agricultura de precisión [Fotografía], por El Blog del Grupo Fertiberia, 2017.




2.10. Definición de IoT

Se basa en la interconexión de productos electrónicos con cualquier otro de su alrededor. El objetivo es que todos los dispositivos se comuniquen entre sí, por consiguiente, sean más inteligentes e independientes (Triana et al., 2018).

Junto con el auge del IoT se empiezan a desarrollar tecnologías de comunicación preparadas para este nuevo escenario (Reyes, 2017). En la Figura 9, se presenta las tecnologías con tres grupos destacados.

Figura 9

Soluciones para conectividad IoT

Local Area Network Short Range Communication	Low Power Wide Area (LPWAN) Internet of Things	Cellular Network Traditional M2M
40%	45%	15%
Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
Bluetooth 4.0  WiFi		

Nota. Adaptado de Soluciones para conectividad IoT (p. 12), por Reyes, 2017.

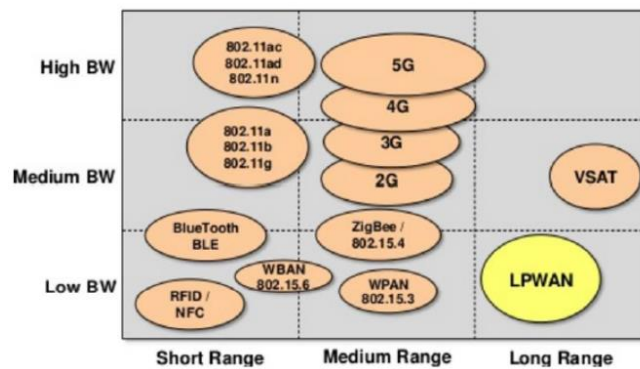
De la Figura 11, se hablará de una variante específica, las LPWAN.

2.10.1. Redes de Área Amplia de Bajo Consumo

Las tecnologías LPWAN nacen como alternativa a las tecnologías inalámbricas tradicionales, lo hacen ofreciendo un consumo muy reducido y un rango de alcance muy alto a cambio de una tasa de datos bastante menor (Reyes, 2017). La Figura 10, presenta el alcance de las LPWAN.

Figura 10

Relación entre el ancho de banda y alcance en tecnologías inalámbricas



Nota. Adaptado de Relación entre el ancho de banda y alcance en tecnologías inalámbricas (p. 14), por Reyes, 2017.

Las tecnologías LPWAN, son un grupo amplio, ofrecen un rango de alcance de 5 – 40km, una duración de batería de hasta 10 años y un coste por dispositivo muy reducido.

Dentro de estas tecnologías existen dos que destacan entre las demás, LoRaWAN y Sigfox. En el ámbito tecnológico se diferencian en la forma en la que hacen la modulación, mientras LoRaWAN usa LoRa (CSS), Sigfox utiliza una técnica llamada UNB (Banda Ultra Estrecha).

Semtech Corporation tiene como objetivo potenciar la venta de chips, esto lo consiguen creando un protocolo libre por encima de LoRa, pero manteniendo LoRa como privado. En cambio, Sigfox tiene como objetivo convertirse en el operador del IoT, para

conseguir esto permiten que se usen chips de una gama muy amplia de fabricantes, pero ellos se encargan de dar el servicio de red (Reyes, 2017).

En la Tabla 16, se muestra una comparación de las tecnologías LPWAN.

Tabla 16

Comparativa entre tecnologías LPWAN

	LoRa	Sigfox	Weightless -P	nWave
Alcance	2-5km (ciudad); 15km (rural)	10km (ciudad); 30-50km (rural)	2km	10km
Banda de frecuencia	433/868/915MHz ISM	Ultra Narrow Band (UNB)	Sub-GHZ ISM	Sub-GHZ ISM
Tasa de envío de datos	300 bps a 50kbps	100 bps, máximo 140 mensajes al día	200 bps a 100 kbps	100 bps
Tasa de recepción de datos	300 bps a 50kbps	4 mensajes de 8 bytes al día	200 bps a 100 kbps	No
Estándar	LoRaWAN	No	Weightless	Weightless

Nota. Adaptado de Comparativa entre tecnologías LPWAN (p. 15), por Reyes, 2017.

2.10.2. LoRa

La plataforma inalámbrica de largo alcance y de bajo consumo, es una opción tecnológica para la construcción de redes IoT en todo el mundo. Esta tecnología emplea espectros de frecuencia de uso público en la banda ISM (como el WiFi y Bluetooth), utiliza una modulación de espectro CSS (Chirp Spread Spectrum) ensanchado en la banda menores a un Ghz, lo que permite largo alcance con distancias mayores a 10 Kilómetros, con alta capacidad de nodos (mayores a 100 nodos) (Triana et al.,2018).

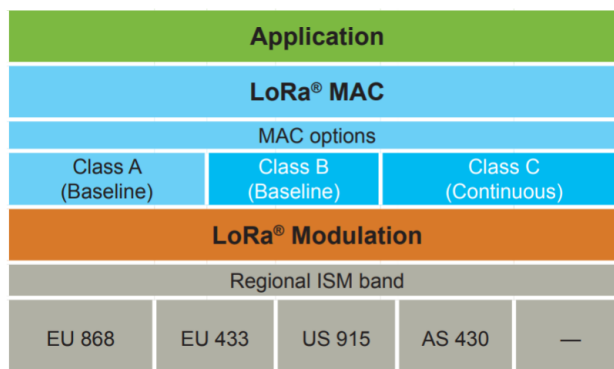
2.10.3. LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo implementado sobre LoRa. Mientras LoRa se encarga de la capa física y habilita conexiones de largo alcance, LoRaWAN se encarga de definir el protocolo de comunicación y la arquitectura de los sistemas.

En la Figura 11, se muestra la pila de funcionamiento LoRaWAN en la que se puede ver la diferencia entre LoRa (capa física) y LoRaWAN.

Figura 11

Pila de funcionamiento LoRaWAN



Nota. Adaptado de Pila de funcionamiento LoRaWAN (p. 16), por Reyes, 2017.

Este protocolo ha sido desarrollado y hecho público por la LoRa Alliance, una organización sin ánimo de lucro dedicada a promover las tecnologías LPWAN (Sornin et al., 2015).

2.10.4. Topología y Componentes de una Red LoRa

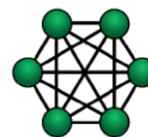
La topología típicamente usada por una red LoRa es la de estrella (Figura 12a), o estrella de estrellas, a diferencia de las topologías de tipo malla (Figura 12b) que usan otras soluciones para el IoT, la topología de estrella ofrece muy buenas latencias y necesidad de menos infraestructura (Reyes, 2017).

Figura 12

Topología de una red LoRa



a)



b)

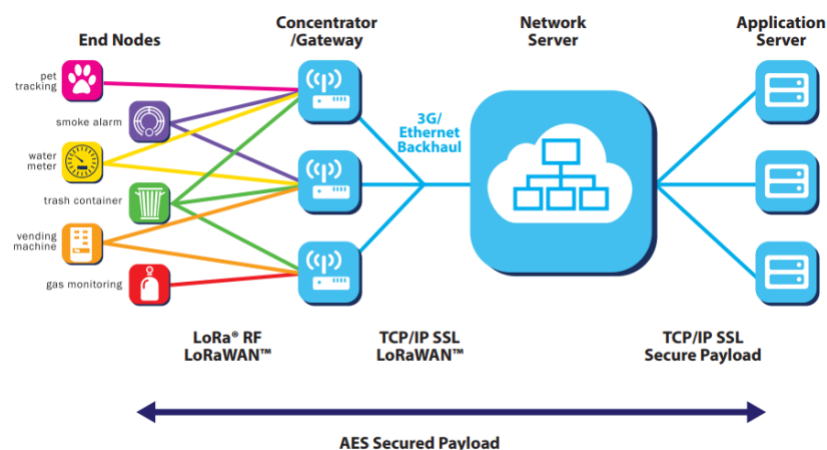
Nota. a) Topología de estrella, b) Topología de malla. Tomado de Topología y componentes de una red LoRaWAN (p.17), por Reyes, 2017.

En estas redes existen los siguientes componentes principales (Figura 13):

- **Nodos:** dispositivos finales, son los encargados de transmitir mensajes al Gateway usando la técnica de modulación LoRa.
- **Gateway:** El gateway o concentrador es el encargado de recibir los paquetes de la red de sensores y enviar al backend mediante una conexión IP.
- **Network Server:** El servidor de red es el encargado de borrar los paquetes que llegan duplicados desde los gateways, reconocer si los paquetes que le llegan pertenecen a su red y en caso de ser así enviarlo al servidor de aplicaciones.
- **Application Server:** El servidor de aplicaciones es el encargado de gestionar los nodos y los usuarios, para facilitar la gestión de las aplicaciones, también se encarga de descifrar los datos fuente (Reyes, 2017).

Figura 13

Componentes principales de una red LoRa



Nota. Adaptado de LoRaWAN architecture [Fotografía], por LoRa Alliance Technical Marketing Workgroup, 2019, LoRa Alliance.

2.10.5. Métodos de Activación

Los dispositivos LoRa tienen un identificador único (DevEUI), que son asignadas por el creador del chip, pero las comunicaciones se hacen mediante otro identificador, DevAddr, este identificador se asigna al enlazar a una red.

Existen dos métodos para que un nodo se una a la red LoRa:

- **Activation by Personalization (ABP):** se escriben directamente las claves de sesión, tanto en el nodo, como en el servidor y se da a conocer la dirección del nodo (el DevAddr, que se ha escrito directamente en el nodo) al servidor, de esta manera la transmisión de paquetes puede empezar directamente.
- **Over-the-Air Activation (OTAA):** en este procedimiento el nodo y el servidor negocian las claves de sesión de forma segura y se le asigna un DevAddr al nodo de forma dinámica.

2.10.6. Canales y Regulación del Espectro de Radiofrecuencia

LoRa opera en un espacio de radiofrecuencia sin licencia ISM (Industria, ciencia y medicina), esto quiere decir que cualquiera puede utilizar esta banda sin pagar licencia.

Estas frecuencias dependiendo de la situación geográfica, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17

Bandas de frecuencia según la región

Región	Banda de frecuencia
Europa	868-870
EEUU	902-928
China	779-897

Nota. Por lo tanto, en América se usa la banda de 902MHz a 928MHz. Tomado de Canales y regulación del espectro de radiofrecuencia (p. 19), por Reyes, 2017.

2.10.7. Clases LoRa

Para los dispositivos finales en LoRa, existen 3 clases diferentes A, B y C.

- **Clase A:** los dispositivos de clase A permiten una comunicación bidireccional. En esta comunicación se pueden enviar mensajes en cualquier momento. Una vez enviado un paquete se abren dos ventanas de recepción en un tiempo especificado. Si el servidor no

responde en esas dos ventanas, se tendrá que repetir el envío por parte del sensor y volver a repetir el proceso.

- **Clase B:** estos dispositivos añaden a las características de los dispositivos de clase A ventanas de recepción programadas. Esto se consigue mediante beacons que envía el servidor, usando estos beacons el gateway y los sensores pueden negociar tiempos de abertura de ventanas de recepción.
- **Clase C:** los dispositivos de la clase C, además de las características de la clase A, tienen las ventanas de recepción abiertas la mayor parte del tiempo, estas solo se cierran cuando se realiza una transmisión.

2.10.8. Seguridad en LoRa

Para la seguridad LoRa utiliza 3 claves de 128 bits:

- **Network Session Key:** esta clave se usa en la interacción del nodo con la red.
- **Application Session Key:** esta clave se usa en la interacción del nodo con el servidor de aplicaciones.
- **Application key:** esta clave se usa cuando se activa un dispositivo usando el método OTAA, sirve para crear las claves de sesión necesarias para la activación (Reyes, 2017).

2.11. Realidad Virtual en la Agricultura

El uso de la tecnología de Realidad Virtual se ha convertido en una importante herramienta de capacitación en procesos industriales, y ya lo es, en la enseñanza de la agricultura. Una extensión natural sería la capacitación de empleados y trabajadores para el trabajo en un sembrío (Alltech, 2020).

2.11.1. Plantas Virtuales

Gracias a la Realidad Virtual, es posible la creación de simulaciones de plantas para estudiar la morfología vegetal del proceso de crecimiento. No es necesario el tiempo de espera por siembras tradicionales, se pueden realizar pruebas que modifiquen su crecimiento y obtener técnicas que mejoren las cosechas (Yu et al., 2010).

2.11.2. Aplicación de Tecnología de Realidad Virtual en la Enseñanza de la Agricultura

Hacer uso de la tecnología informática interactiva multimedia, da la oportunidad de ver, escuchar y controlar el proceso dinámico de las condiciones de crecimiento de los cultivos desde distintos ángulos, obteniendo los mejores resultados con respecto a formas tradicionales (Yu et al., 2010).

La tecnología de Realidad Virtual contribuye al uso eficiente de la producción agrícola y el uso de sus recursos, permitiendo reducir el ciclo de investigación y la obtención de resultados directos que en la realidad son procesos sumamente complejos y que implican mucho espacio, dinero y tiempo.

2.11.3. La Realidad Virtual y su Aplicación en la Agricultura

La visión del productor, entendida como imaginación prefigurativa, cumple una función predictiva de los ciclos del cultivo. Sin embargo, la incorporación de cascos de realidad virtual y apps para smartphones en el agro constituyen un avance cualitativo importante. (AgroSpray, 2020).

La VR, se aplica en agricultura para ver a priori fases de desarrollo del cultivo. Esta visión anticipa escenarios posibles para prever estrategias y acciones pertinentes. Un suministro de información cuantitativa y graficada acompaña la experiencia.

Los implementos para el entorno de VR, permite procesar los datos para transformarlos en gráficos e imágenes. Así, una maquinaria agrícola puede ser recreada en su interior sin necesidad de intervenir.

La Realidad Virtual forma parte de la incorporación de tecnología a la agricultura. Su avance corresponde a una generación de jóvenes profesionales que tienen la capacidad de sacar el mayor provecho de tal herramienta.

El desarrollo de la agricultura inteligente, emplea herramientas sofisticadas de alto rendimiento. La Realidad Virtual está en consonancia con dichos adelantos progresivos e integradores para aumentar la productividad del campo (AgroSpray, 2020).

2.11.4. Uso de Realidad Virtual en la Agricultura

Algunas proyecciones apuntan aumentar la productividad de siembras pasadas, brindando información en tiempo real al productor sobre parámetros importantes del cultivo.

Se están generando propuestas que unen al campo y la educación. La creación de una “Smart Farm”, por ejemplo, que fusionaría la escuela con las nuevas tecnologías para acercar a los jóvenes al sector agrario y ganadero (Agricultura Moderna, 2018).

2.11.5. Elementos para Integración del Entorno de Realidad Virtual

- **Unity 3D:** es un motor que permite la creación de juegos y otros contenidos interactivos como diseños arquitectónicos o animaciones 3D en tiempo real. Unity es una aplicación 3D en tiempo real y multimedia además de ser motor 3D y físico utilizado para la creación de juegos en red, de animación en tiempo real, de contenido interactivo compuesto por audio, video y objetos 3D (Ouazzani, 2012). En la Figura 14, se muestra el entorno de trabajo de Unity 3D.

Figura 14

Interfaz de Unity 3D



Nota. Adaptado de Introducción al desarrollo de videojuegos para móvil con Unity 3D[Fotografía], por CLEFormación, 2017.

- **Blender:** es un programa escrito en código Python, el cual también es un software libre de programación, la interfaz de Blender permite la creación de figuras a partir de formas simples con un concepto de creación básico, el programa presenta diversas posibilidades

de diseño y acabados, etc. (Pinzás, 2009). En la Figura 15, se presenta el entorno de trabajo de Blender.

Figura 15

Interfaz de Blender



Nota. Adaptado de Qué es blender y para qué sirve [Fotografía], por ARTICNE, 2020, Articne.

- **Virtual desktop:** es una aplicación de retransmisión de PC a Oculus Quest con lo cual se puede ver nuestros monitores en un entorno virtual y usar los periféricos (teclado, ratón, etc.) (AlejandoroVR, 2020). En la Figura 16, se presenta un ejemplo del streaming.

Figura 16

Plataforma de streaming Virtual Desktop



Nota. Adaptado de How to use your Oculus Quest 2 to play any PC VR game wirelessly [Fotografía], por The Verge, 2021, Verge.

- **Oculus quest:** son unas gafas de realidad virtual cómodas que, sin ser perfectas (fugas de luz y peso), son una buena puerta de entrada a la realidad virtual. El no necesitar de sensores de posición adicionales y poder jugar literalmente en cualquier lado es

sencillamente fabuloso (García, 2020). En la Figura 17, se presenta las gafas Oculus quest.

Figura 17

Gafas de Realidad Virtual



Nota. Adaptado de Oculus exigirá una cuenta de Facebook para usar sus gafas VR

[Fotografía], por Hipertextual, 2020.

2.12. Energía Solar Fotovoltaica

Más energía solar llega a la tierra en una hora que la consumida por el planeta en un año por lo que cada día esta energía recibe más atención como fuente de energía sostenible. El mercado solar mundial es actualmente de más de 10.000 millones de dólares al año y la industria está creciendo en un 30% anual (Lewis, 2009).

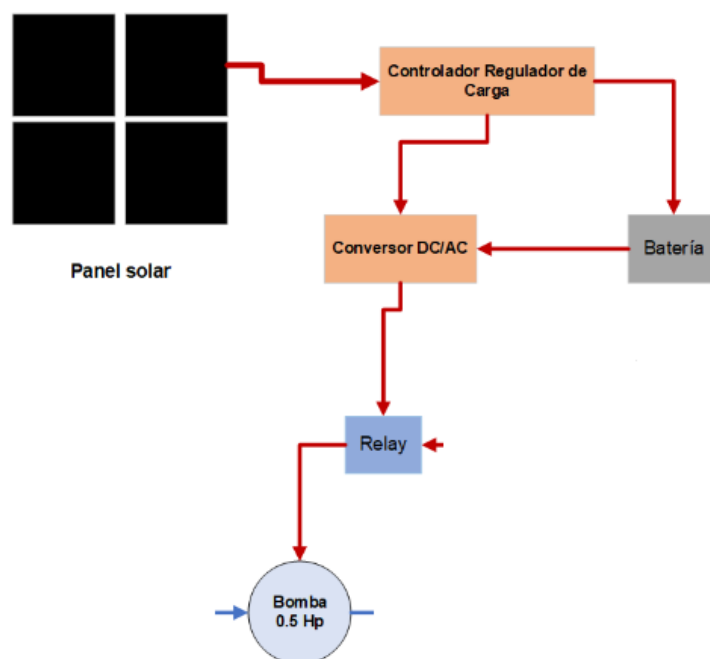
Una de las principales aplicaciones de la energía solar, es mediante el efecto fotoeléctrico. Según (Abella, 2005) los generadores fotovoltaicos que la diferencia de otras fuentes de energía renovable es que únicamente producen electricidad cuando reciben la luz del Sol (irradiación solar) y además la cantidad de energía que generan es directamente proporcional a la irradiación solar que incide sobre su superficie. Resulta evidente que en multitud de aplicaciones el consumo energético se produce independientemente de la radiación solar (en la noche). En este tipo de aplicaciones es necesario incluir un sistema de almacenamiento energético o de acumulación. En general, un sistema fotovoltaico estará formado por:

- Un generador fotovoltaico.
- Una batería de acumulación.
- Un regulador de carga.
- Un inversor.
- El consumo.

La planta fotovoltaica debe proveer corriente alterna de 120V o 220V, por lo cual los elementos adicionales a los paneles solares como: un regulador de carga, que provee un voltaje constante de corriente directa para la carga y protege a las baterías acumuladoras de sobrecargas; las baterías acumuladoras, proporcionan energía a la instalación en periodos sin luz solar, acumulan energía para la instalación; el inversor DC/AC, convierte la corriente continua en alterna de 120V o 220V (Planas, 2019). En la Figura 18, se presenta los componentes de una planta fotovoltaica.

Figura 18

Componentes de una planta fotovoltaica



Nota: La figura 19 describe el esquema a implementar en el presente proyecto para accionar una bomba de ½ hp a 110V.

Capítulo III

3. Diseño e Implementación

En el capítulo se describe el diseño del sistema, presentando las tecnologías y los dispositivos que se utilizaron para el monitoreo, comunicación, plataforma IoT, entorno de realidad virtual y sistema de generación eléctrica con panel solar. También, se presenta cada paso de los subsistemas implementados y completamente operativos.

3.1. Sistema de Agricultura Inteligente

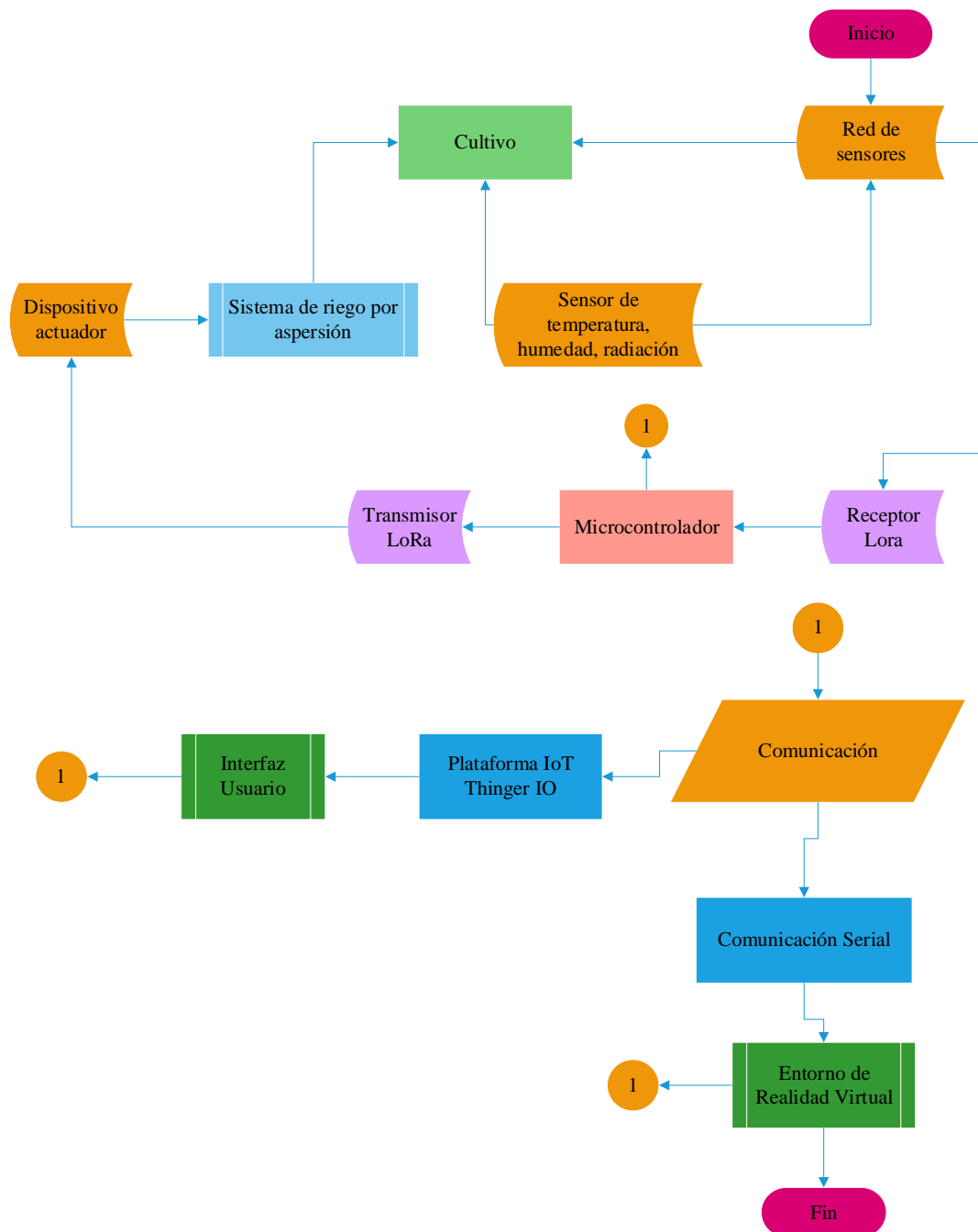
El sistema de agricultura inteligente está integrado por subsistemas como:

- Redes de sensores, dispositivos con comunicación Lora
- Módulo coordinador central
- Interfaz gráfica de usuario, plataforma IoT
- Entorno de realidad virtual
- Sistema de generación eléctrica con panel solar para el funcionamiento de la bomba de riego.

El diseño se desarrolló en base al diagrama de flujo de la Figura 19. Realiza las funciones de transmitir las variables del cultivo a través de la red de sensores hacia el módulo coordinador central para luego enviar la información a la plataforma IoT y al entorno de realidad virtual que mediante los parámetros de cultivo activa el sistema de riego por aspersión para mitigar el estrés abiótico por bajas temperaturas.

Figura 19

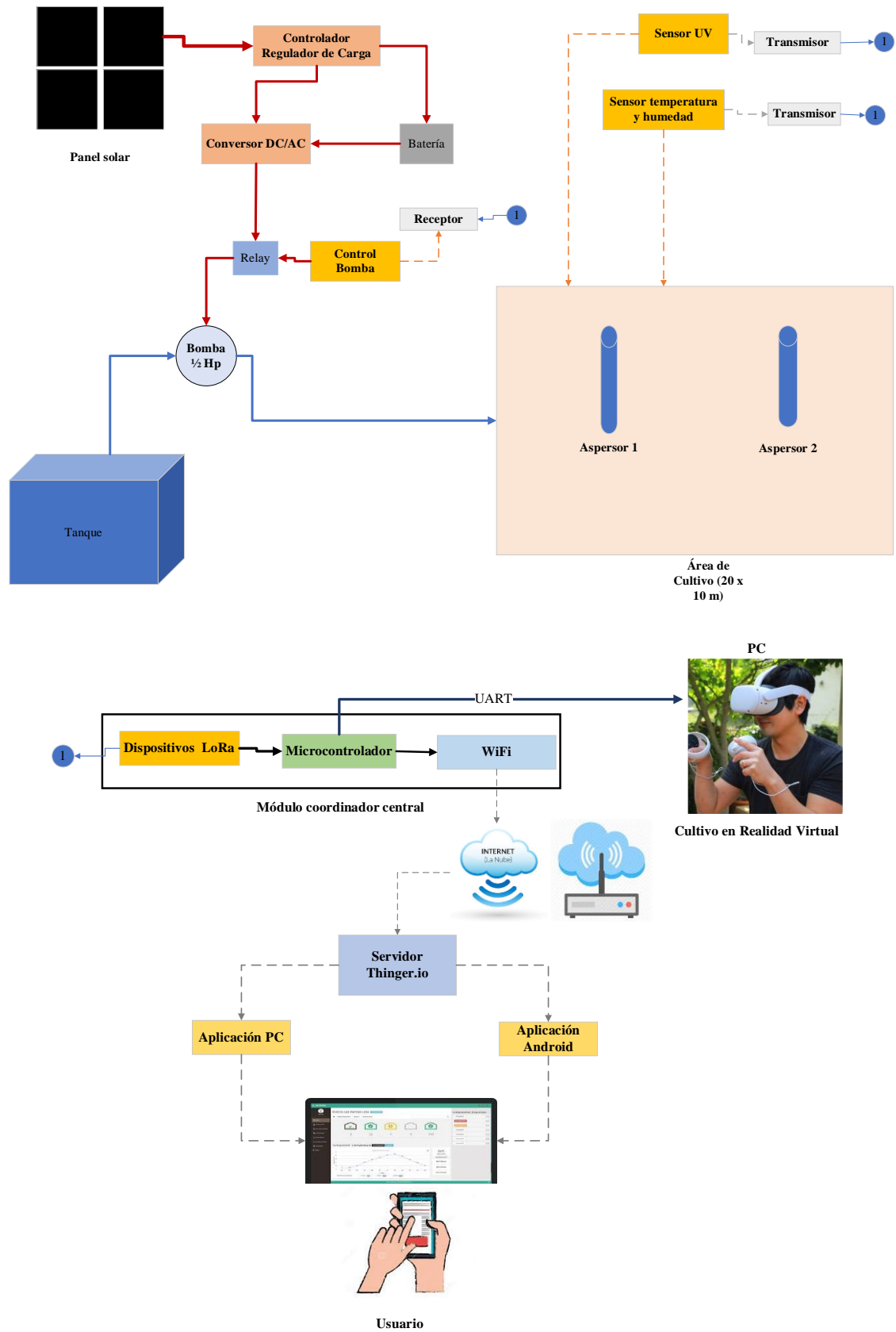
Diagrama de flujo del sistema de agricultura inteligente



En la Figura 20, se presenta el diseño esquemático, que consta con los elementos empleados en el sistema de agricultura inteligente: panel solar, controlador regulador de carga, convertor DC/AC, baterías, relé, bomba de agua, aspersores, dispositivos de comunicación LoRa, sensores, microcontrolador, servidor IoT, visor de realidad virtual.

Figura 20

Diseño esquemático del sistema de agricultura inteligente



3.2. Tecnologías Necesarias

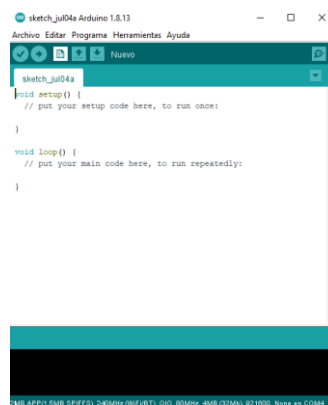
En el ámbito de un proyecto académico, es factible recurrir a tecnologías libres como elementos para el diseño de diferentes sistemas. Es por ello que a continuación se presenta algunos conceptos y características de las tecnologías que se van a emplear en la red de sensores.

3.2.1. Arduino IDE

IDE – entorno de desarrollo integrado, es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación para Arduino, permite agregar tarjetas adicionales como el ESP32 para crear aplicaciones. La Figura 21, presenta el entorno de desarrollo.

Figura 21

Arduino IDE



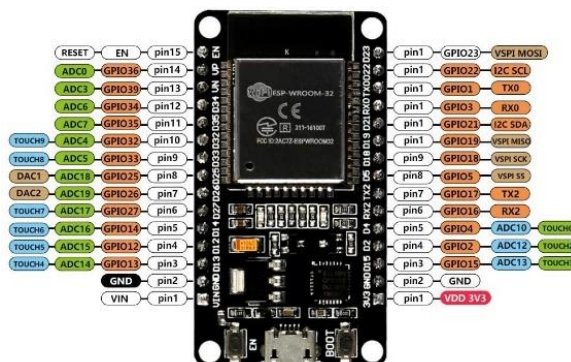
Nota. Tomado de Arduino IDE.

3.2.2. ESP32

El ESP32 surgió del ESP8266 que es un módulo microcontrolador con conectividad wifi lanzado por la compañía ESPRESSIF en el año 2014. Primeramente, se utilizó como módulo de wifi para Arduino por su bajo costo, luego se liberó la API para desarrollar directamente sobre él de forma independiente en el entorno de Arduino. Ya a finales del 2016 dicha empresa lanzó el ESP32, pensado para IoT, con mucha más potencia que su antecesor (Herrera et al., 2019). La Figura 22, presenta la placa ESP32.

Figura 22

Módulo ESP32



Nota. Adaptado de Los módulos ESP32 y LoRa más vendidos [Fotografía], por Formacion profesional, 2021.

3.2.3. Heltec WiFi LoRa 32 (V2)

WiFi LoRa 32 es una placa de desarrollo de IoT, diseñada y producida por Heltec Automation (TM), es un producto integrado basado en ESP32 + LoRa SX127x a frecuencia de 433, 868 y 915 MHz, tiene funciones WiFi, Bluetooth, también sistema de administración de batería Li-Po, e incluyen OLED de 0,96 ". Es la mejor opción para ciudades inteligentes, granjas inteligentes, hogares inteligentes y fabricantes de IoT (Heltec Automation, 2021). La Figura 23, presenta el módulo Heltec.

Figura 23

Heltec WiFi LoRa 32 (V2)



Nota. Adaptado de Wifi LoRa 32 (V2) [Fotografía], por Heltec Automation, 2021.

3.2.4. TTGO ESP32 LoRa-OLED (V1)

Es una placa que tiene integrado el microcontrolador ESP32, una pantalla OLED de 0,96" y un chip LoRa SX1276 (Semtech Corporation, 2021), frecuencia de 868 a 915 MHz, alta sensibilidad superior a 148 dBm, potencia de salida de + 20 dBm, alta confiabilidad, transmisión de larga distancia. En la Figura 24, se presenta el modelo del TTGO.

Figura 24

TTGO ESP32 LoRa - OLED (V1)



Nota. Adaptado de TTGO Lora series [Fotografía], por LILYGO, 2020.

3.2.5. Sensores

Un sensor es un dispositivo para detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas; las variables de instrumentación pueden ser: temperatura, humedad, radiación UV, etc. (Herrera et al., 2019).

3.2.5.1. Sensor de Temperatura y Humedad Relativa DHT21 (AM2301). Es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de buena precisión con un empaque robusto. Integra un sensor capacitivo de humedad, un termistor y un microcontrolador encargado de realizar la conversión analógica a digital. Su empaque de plástico robusto hace del DHT21 un sensor ideal para aplicaciones en exteriores. Utilizado en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura (Naylamp Mechatronics SAC, 2021). En la Figura 25, se presenta el módulo sensor.

Figura 25*DHT21*

Nota. Adaptado de Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301)

[Fotografía], por Naylamp Mechatronics SAC, 2021.

3.2.5.2. Sensor de Humedad de Suelo Capacitivo. Permite medir la humedad en el suelo utilizando el principio de capacitancia entre electrodos en lugar de resistencia, lo que aumenta considerablemente la vida útil del sensor. El electrodo posee una capa de protección anticorrosión para una mayor duración (no se oxida como el sensor resistivo). El sensor es ideal para monitorear el nivel de humedad de las plantas.

El funcionamiento del sensor se basa en medir la capacitancia entre 2 electrodos insertados dentro del suelo, la capacitancia entre los electrodos dependerá de la humedad del suelo, por lo que para un suelo muy húmedo tendremos una capacitancia muy baja y para un suelo muy seco la capacitancia será muy alta. El electrodo va conectado a una tarjeta de acondicionamiento que entrega una salida analógica. La salida analógica (AO) entrega un voltaje analógico desde 0V para un suelo muy húmedo hasta 5V para un suelo muy seco (Naylamp Mechatronics SAC, 2021). En la Figura 26, se muestra el modelo.

Figura 26*Sensor de humedad de suelo capacitivo*

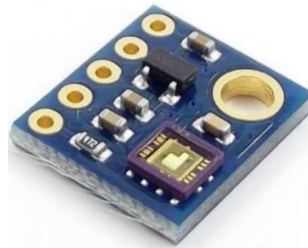
Nota. Adaptado de Sensor de humedad de suelo capacitivo [Fotografía], por Naylamp Mechatronics SAC, 2021.

3.2.5.3. Módulo ML8511 Detector UV. Es un sensor de luz ultravioleta (UV), entrega una señal analógica que depende de la cantidad de luz UV que detecta. Es usado en proyectos de monitoreo de condiciones ambientales como el índice UV.

El sensor ML8511 detecta luz con una longitud de onda entre 280-390nm, este rango cubre tanto al espectro UV-B como al UV-A. La salida analógica está relacionada linealmente con la intensidad UV (mW/cm^2) (Naylamp Mechatronics SAC, 2021). En la Figura 27, se presenta el sensor.

Figura 27

Sensor de humedad de suelo capacitivo



Nota. Adaptado de Módulo ML8511 detector UV [Fotografía], por Naylamp Mechatronics SAC, 2021.

3.3. Diseño de la Red de Sensores

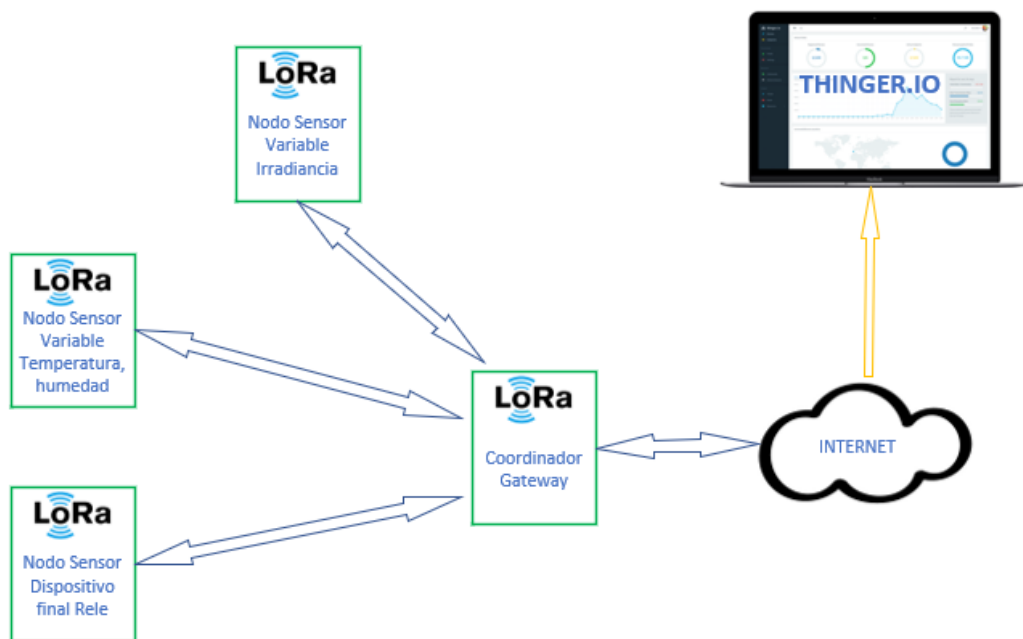
Para el diseño de la red de sensores se utilizan módulos TTGO ESP32 LoRa con chip SX1276, para enviar y recibir información.

Se diseñó la red de sensores mostrada en la Figura 28, se dispone de tres nodos que operarán como dispositivos finales que se encargarán de monitorear y controlar las condiciones ambientales que ocasionan los factores abióticos por bajas temperaturas.

Los dispositivos finales se comunican con el módulo coordinador central “Gateway”.

Figura 28

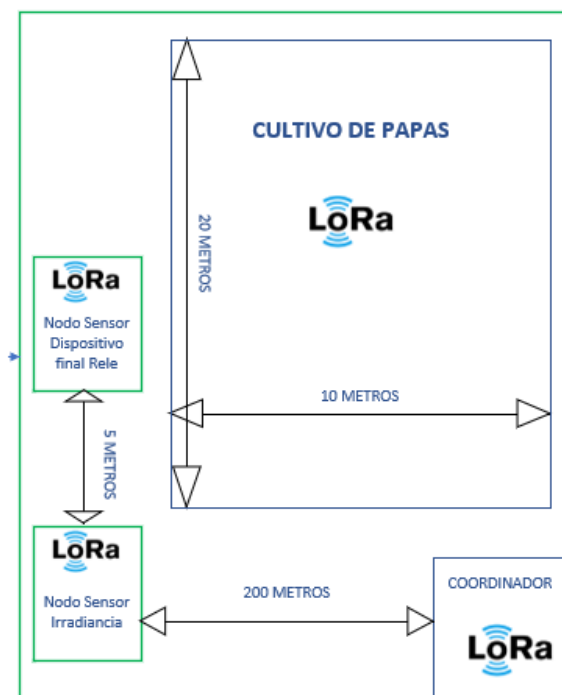
Diseño de la red de sensores con LoRa



La ubicación física de la red de sensores, se muestra en la Figura 29, el cual se encuentra conformado por el módulo coordinador central y los nodos finales.

Figura 29

Ubicación de los nodos en el terreno



Se diseña una red tipo estrella en un área de 200 m² de cultivo. La topología estrella es una de las más utilizadas en las redes LoRa y se puede agregar nuevos dispositivos finales, sin afectar el funcionamiento del sistema. En la Figura 30, se presenta la configuración de la red en tipo estrella.

Figura 30

Topologías de la red de sensores en el cultivo



Nota. Adaptado de Google Earth.

3.3.1. Diseño de los Nodos Finales

Los nodos de la red de sensores, realizan las tareas de monitoreo de variables ambientales y control como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Nodos finales

Ítem	Parámetro de medición	Rango de medición	Modelo sensor	Precisión
Nodo 1	Temperatura ambiente	-40 a 80 °C	Módulo DHT21 (AM2301)	±0.5°C
	Humedad ambiente o relativa	0 a 100%	Módulo DHT21 (AM2301)	±3%
	Humedad del suelo	0 a 100%	Sensor capacitivo de humedad del suelo	±2%
Nodo 2	Radiación UV	0 a 15 Índice	Módulo ML8511	±1 Índice
	Parámetro de control	Rango de control	Modelo conmutador	Indicador
Nodo 3	Bomba de agua	0 - 1	Relé 5 VDC / 10Amp	ON/OFF

El nodo 1, está compuesto por el módulo TTGO ESP32 LoRa SX1276 (915MHz) que trabaja como microcontrolador y dispositivo de transmisión de datos del sensor DHT21 y del sensor de humedad del suelo, se muestra el diseño esquemático en la Figura 31 y el diseño electrónico de la Figura 32.

Figura 31

Nodo 1: Diseño esquemático para el monitoreo de temperatura y humedad

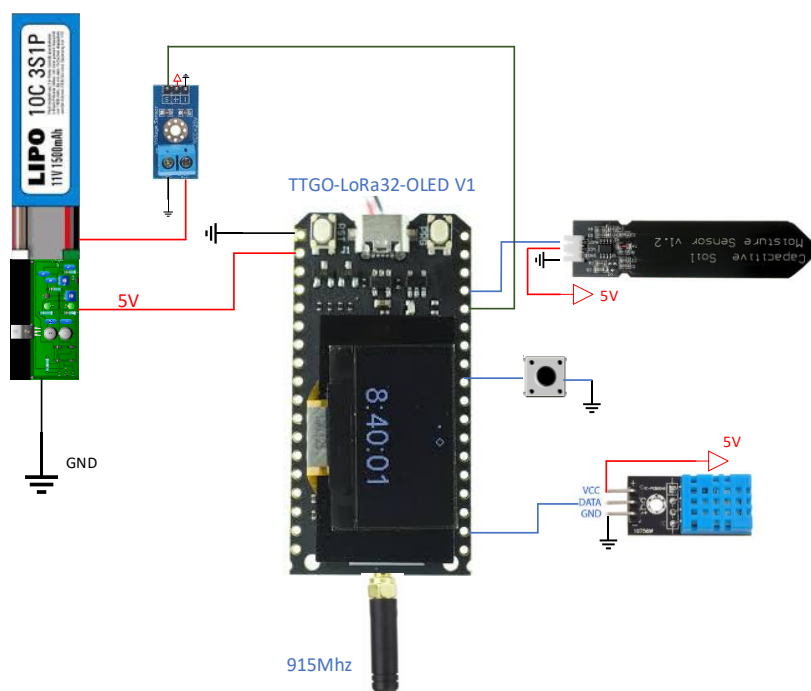
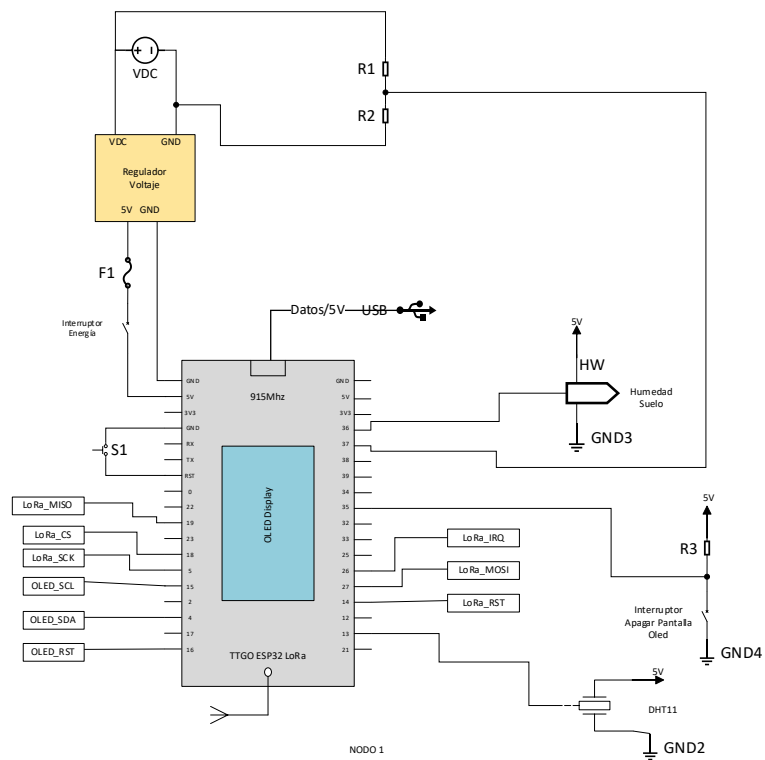


Figura 32

Nodo 1: Diseño electrónico para el monitoreo de temperatura y humedad



El nodo 2, está compuesto por el módulo TTGO ESP32 LoRa SX1276 (915MHz) que trabaja como microcontrolador y dispositivo de transmisión de datos del sensor ML8511, se muestra el diseño esquemático en la Figura 33 y el diseño electrónico de la Figura 34.

Figura 33

Nodo 2: Diseño esquemático para el monitoreo de radiación UV

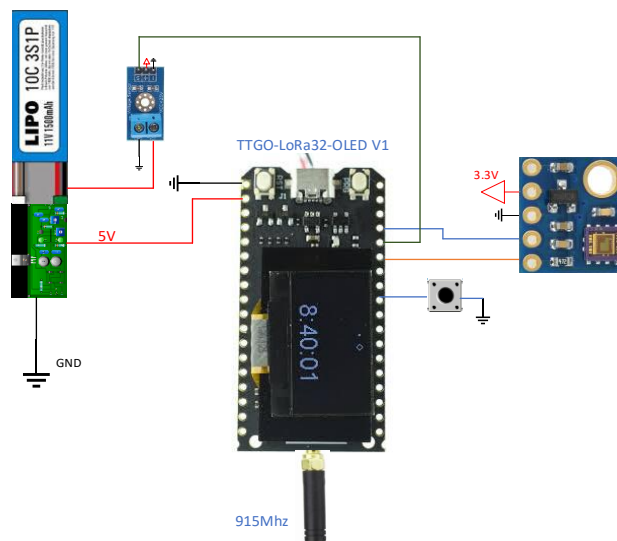
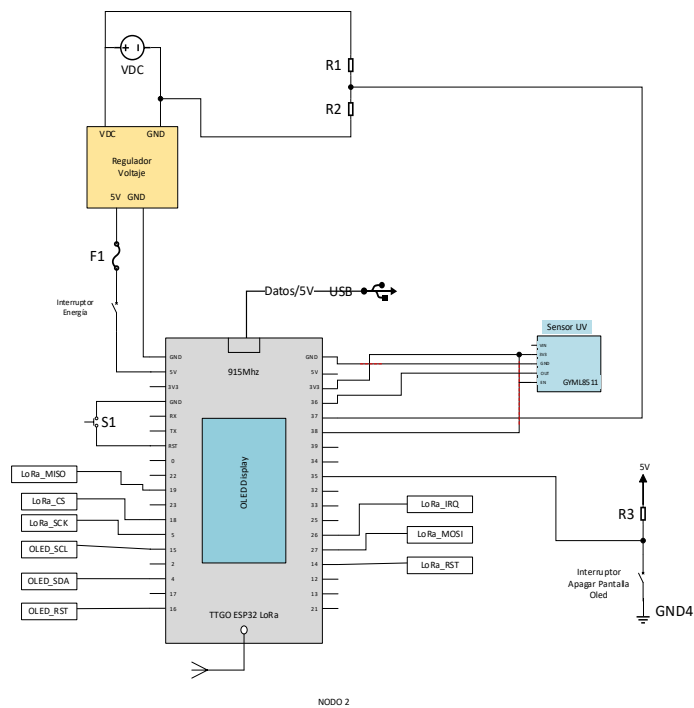


Figura 34

Nodo 2: Diseño electrónico para el monitoreo de UV



El nodo 3, está compuesto por el módulo TTGO ESP32 LoRa SX1276 (904 MHz) que trabaja como microcontrolador y dispositivo receptor de datos del módulo coordinador central para el control de la bomba de agua, se muestra el diseño esquemático en la Figura 35 y el diseño electrónico de la Figura 36.

Figura 35

Nodo 3: Diseño esquemático del dispositivo de control final con relé

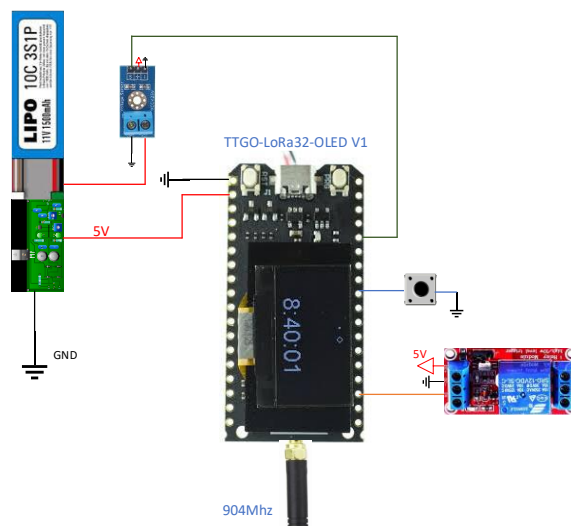
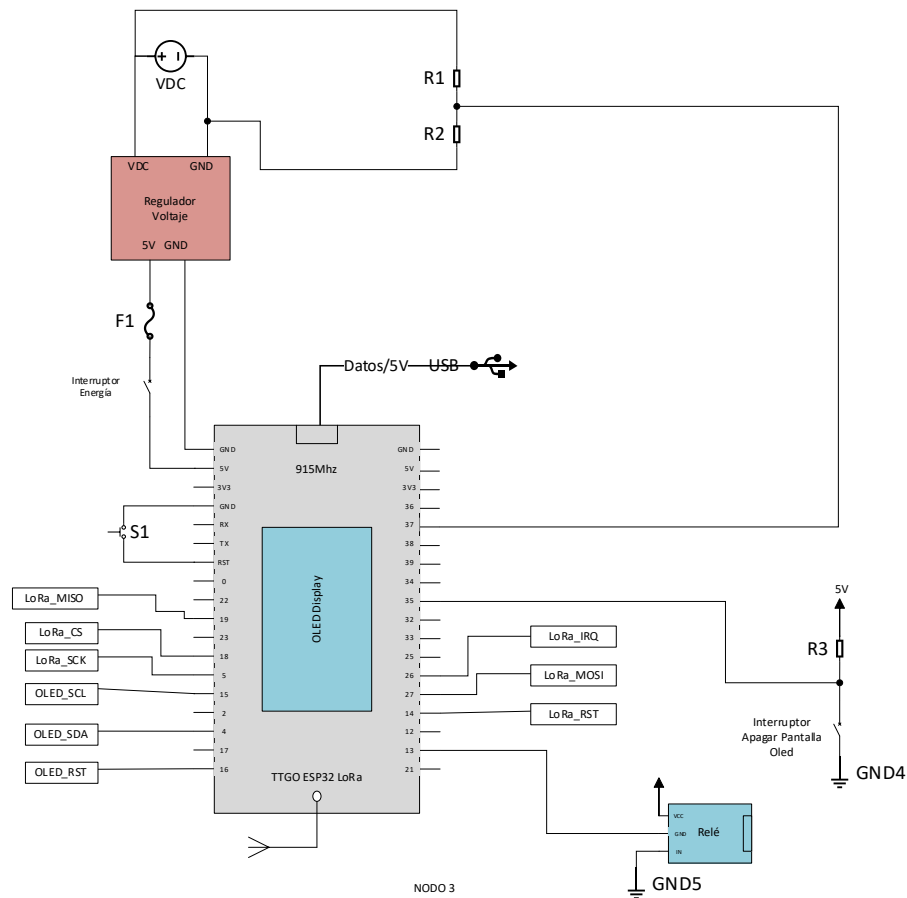


Figura 36

Nodo 3: Diseño electrónico del dispositivo de control final con relé



3.3.2. Diseño del Módulo Coordinador Central

El módulo coordinador central “Gateway”, cumple con la función de crear una puerta de enlace LoRa de doble canal (transmisor 904Mhz / receptor 915Mhz).

El Gateway se comunica con la red de sensores por medio del módulo Heltec LoRa 32 (V2), la información receptada de los dispositivos de monitoreo se envía a la tarjeta electrónica ESP32 por medio de comunicación I2C, estas son procesadas por el microcontrolador, el cual las empaqueta y transmite por la red IP utilizando el módulo WiFi integrado hacia la plataforma IoT y por el puerto serial al entorno de realidad virtual. En la Figura 37, se presenta la arquitectura del coordinador central y en la Tabla 19, la arquitectura de comunicación.

El coordinador central es energizado por medio del puerto Universal Serial Bus (USB) disponible en la tarjeta o por el puerto de alimentación de 12 VDC, incorporado en el diseño del Gateway.

Figura 37

Arquitectura del coordinador central

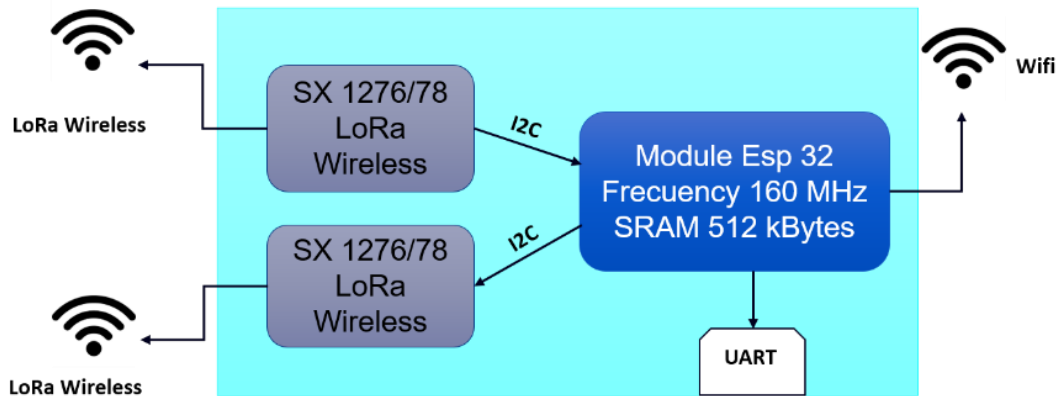


Tabla 19

Arquitectura de comunicación

Arquitectura de comunicación	
Aplicación	Plataforma IoT
Sesión	
Transporte	Internet
Red	WiFi IP
Enlace de datos	I2C
Física	LoRa

En la Figura 38, se observa el diseño esquemático del coordinador central y el diseño electrónico en la Figura 39.

Figura 38

Diseño esquemático del módulo coordinador central

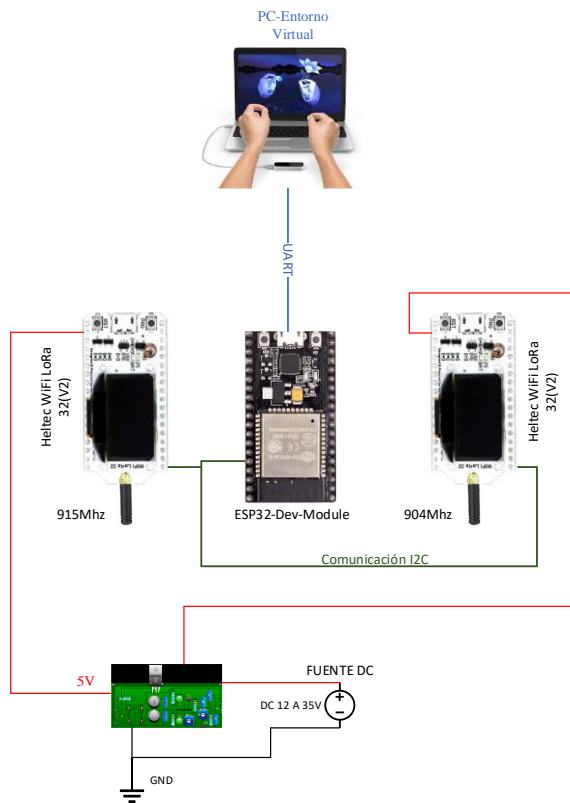
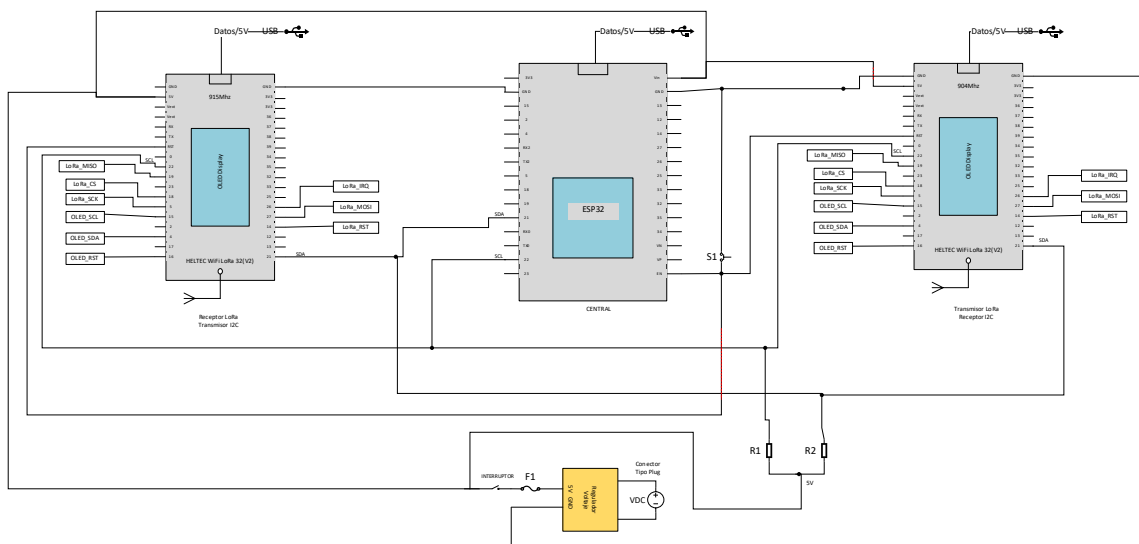


Figura 39

Diseño electrónico del módulo coordinador central



3.4. Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario

Las plataformas de IoT es considerada el componente más importante del ecosistema del internet de las cosas, permiten visualizar, gestionar y controlar los dispositivos de las redes de sensores. En la Figura 40, se presenta los elementos del sistema para su funcionalidad.

Figura 40

Elementos para la funcionalidad de la interfaz de usuario



Por las prestaciones, como suscripción con cuenta gratuita, monitoreo y control, tiempo de actualización de hasta 1 segundo por lectura, adaptabilidad a diferentes placas de desarrollo, configuración de la interfaz gráfica, base de datos y gestión de alarmas, se opta por la plataforma IoT Thinger.io.

3.4.1. Plataforma Thinger.io

Es una plataforma de código abierto. Thinger.io es una plataforma de IoT en la nube que proporciona todas las herramientas necesarias para crear prototipos, escalar y administrar productos conectados de una manera muy simple (Thinger.io, 2021).

Dispone de una consola de administración potente donde se puede gestionar objetos conectados. Además, la documentación es muy extensa y libre.

- **Plataforma gratuita de IoT:** Thinger.io proporciona una cuenta gratuita de por vida con solo unas pocas limitaciones, ver la Tabla 20.
- **Independiente del hardware:** Cualquier dispositivo de cualquier fabricante se puede integrar fácilmente con la infraestructura de Thinger.io.

Tabla 20

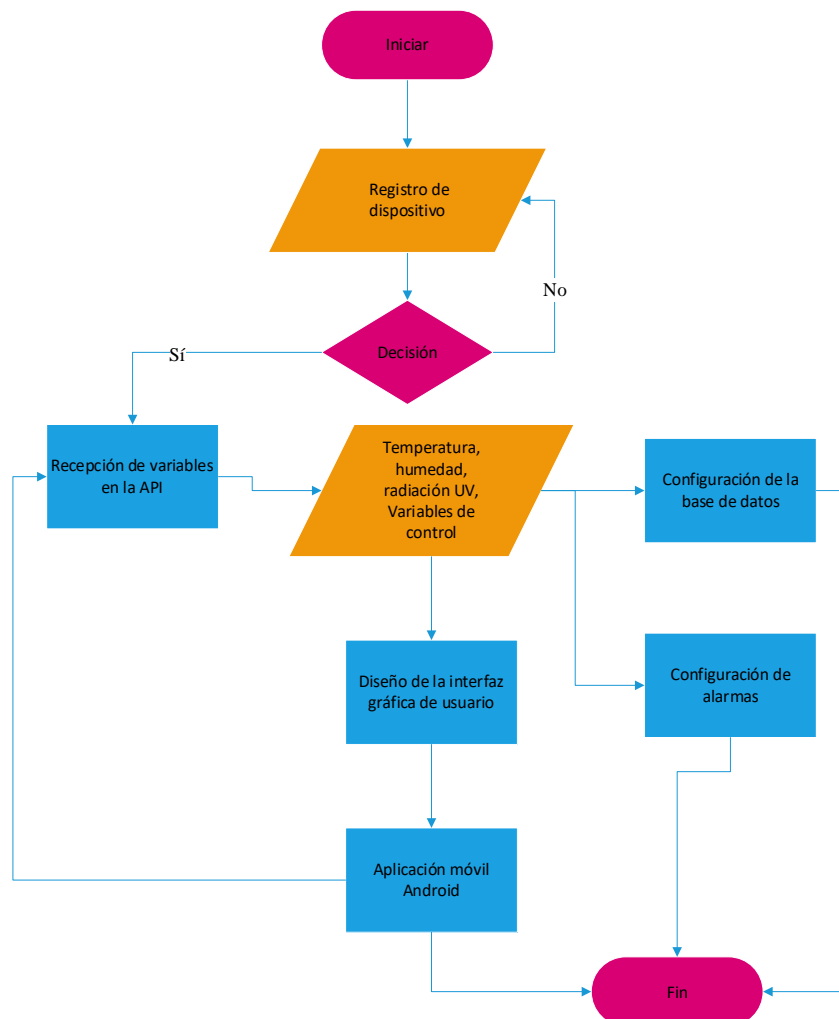
Thinger.io con cuenta gratis

Thinger.io	Licencia
Tiempo histórico (meses)	30 días
Numero de dispositivos	2
Precio	Gratis

La Figura 41, presenta el diagrama de flujo del diseño de la interfaz gráfica de usuario. Para transmitir los datos desde el módulo coordinador central hacia el servidor IoT; primero se registra y configura el dispositivo para obtener las credenciales de acceso hacia la plataforma Thinger.io; para luego diseñar el HMI, configurar la base de datos y alarma.

Figura 41

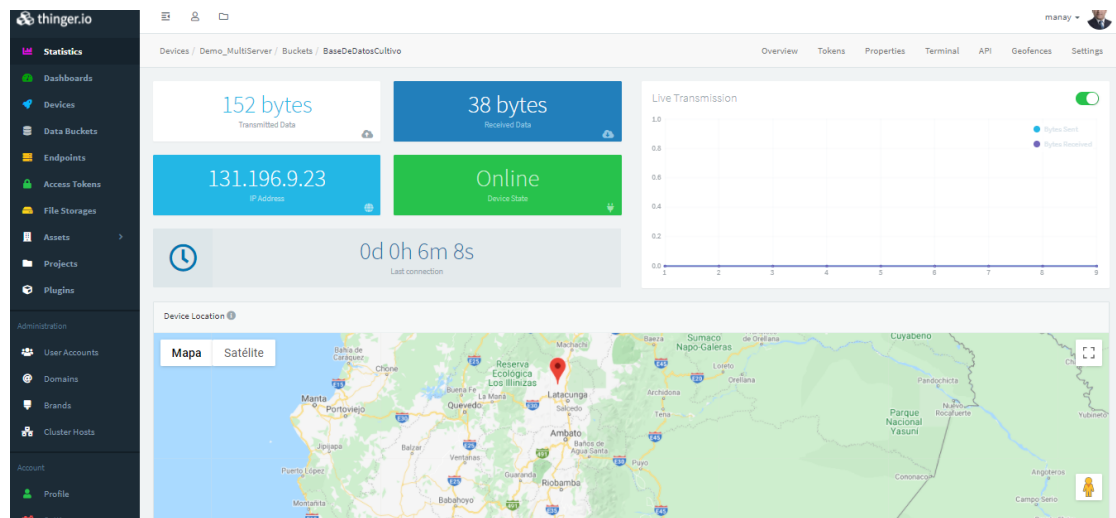
Diagrama de flujo del diseño de la interfaz gráfica de usuario



3.4.1.1. Configuración del Dispositivo. Para conectar y recibir las variables del módulo coordinador central, se debe configurar y registrar el dispositivo al que se va a conectar en “Devices” y verificar los datos receptados en la API. En la Figura 42, se presenta el dispositivo en línea y en la Figura 43, las variables registradas.

Figura 42

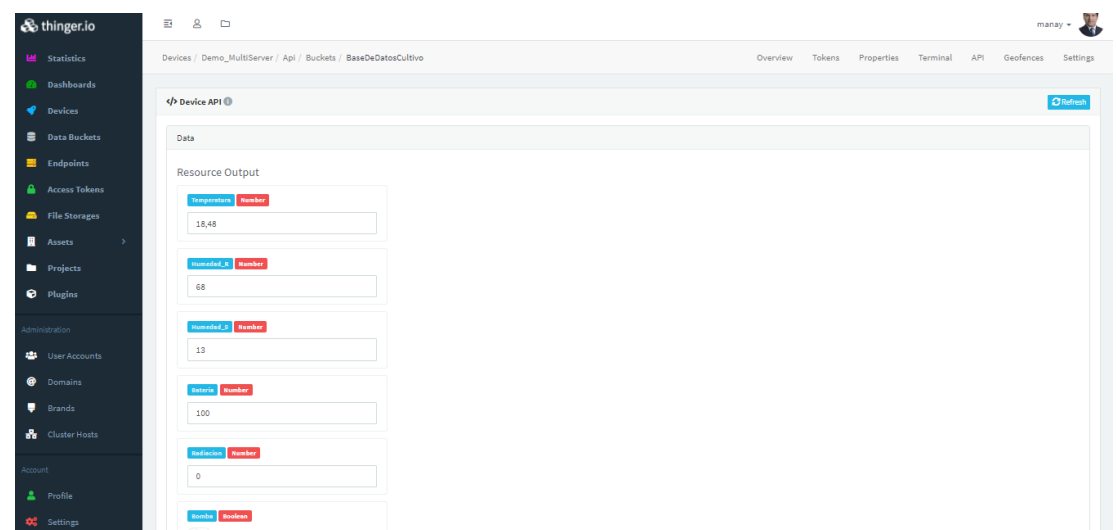
Registro del dispositivo a conectar



Nota. Adaptado de Thinger.io.

Figura 43

Recepción de variables en la API

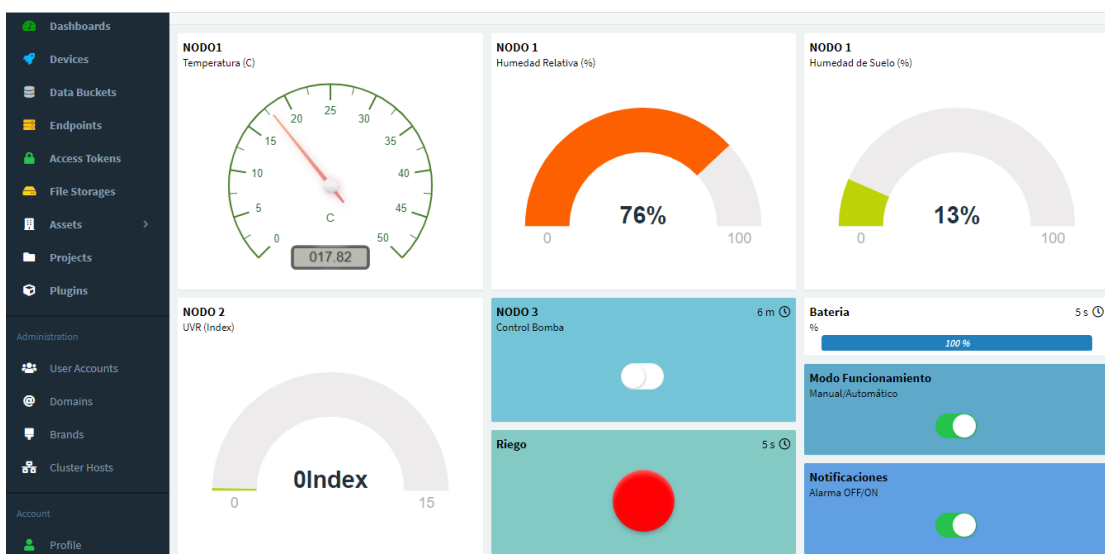


Nota. Verificado las lecturas en la API, se puede diseñar la interfaz gráfica de usuario en “Dashboard”.

3.4.1.2. Interfaz Gráfica. La interfaz de usuario se diseña en el “Dashboard”, que está formado por widget (indicadores) de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, radiación UV, activación manual de la bomba, modo de funcionamiento (manual/automático), modo de notificaciones (alarma), como se observa en la Figura 44.

Figura 44

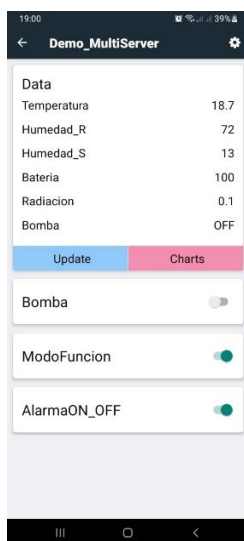
Interfaz de usuario, plataforma web Thinger.io



Thinger.io, dispone de una aplicación móvil para Android (descargar de Play Store), en la cual se puede visualizar las variables preconfiguradas, como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Interfaz de usuario, aplicación móvil Android



3.4.1.3. Base de Datos. Se configura una base de datos en “Data Buckets”, para guardar las variables mencionadas que llegan de la red de sensores, como se puede observar en la Figura 46.

Figura 46

Base de datos

Bucket Data						
Date	Bateria	Bomba	Humedad_R	Humedad_S	Radiacion	Temperatura
2021-07-12T22:29:45.099Z	100	false	91	39	0.00	9.68
2021-07-12T22:26:12.929Z	100	false	90	39	0.00	9.68
2021-07-12T22:16:12.937Z	100	false	91	39	0.00	9.90
2021-07-12T22:06:13.783Z	100	false	91	39	0.00	9.90
2021-07-12T21:56:12.963Z	100	false	91	39	0.00	9.90
2021-07-12T21:46:13.002Z	100	false	90	39	0.00	9.46
2021-07-12T21:36:12.983Z	100	false	91	39	0.00	9.02
2021-07-12T21:26:13.073Z	100	false	91	40	0.00	9.24
2021-07-12T21:16:13.086Z	100	false	91	39	0.00	9.24
2021-07-12T21:06:13.983Z	100	false	92	40	0.00	9.24
2021-07-12T20:56:13.055Z	100	false	90	39	0.00	9.46
2021-07-12T20:46:14.732Z	100	false	84	38	0.00	10.34

Nota. Las variables guardadas en la base de datos se mantienen durante 30 días.

3.4.1.4. Alarmas. Se configura una alarma en “Endpoints”, para notificar al agricultor cuando la temperatura del cultivo se encuentra en valores menores a 4°C, cómo se puede observar en la Figura 47.

Figura 47

Alarmas, notificaciones para temperaturas menores a 4°C

Endpoint Details

Test Endpoint

Endpoint Identifier

Endpoint Description

Enabled

Endpoint Type

Bot Token

Chat Identifier

Chat Message

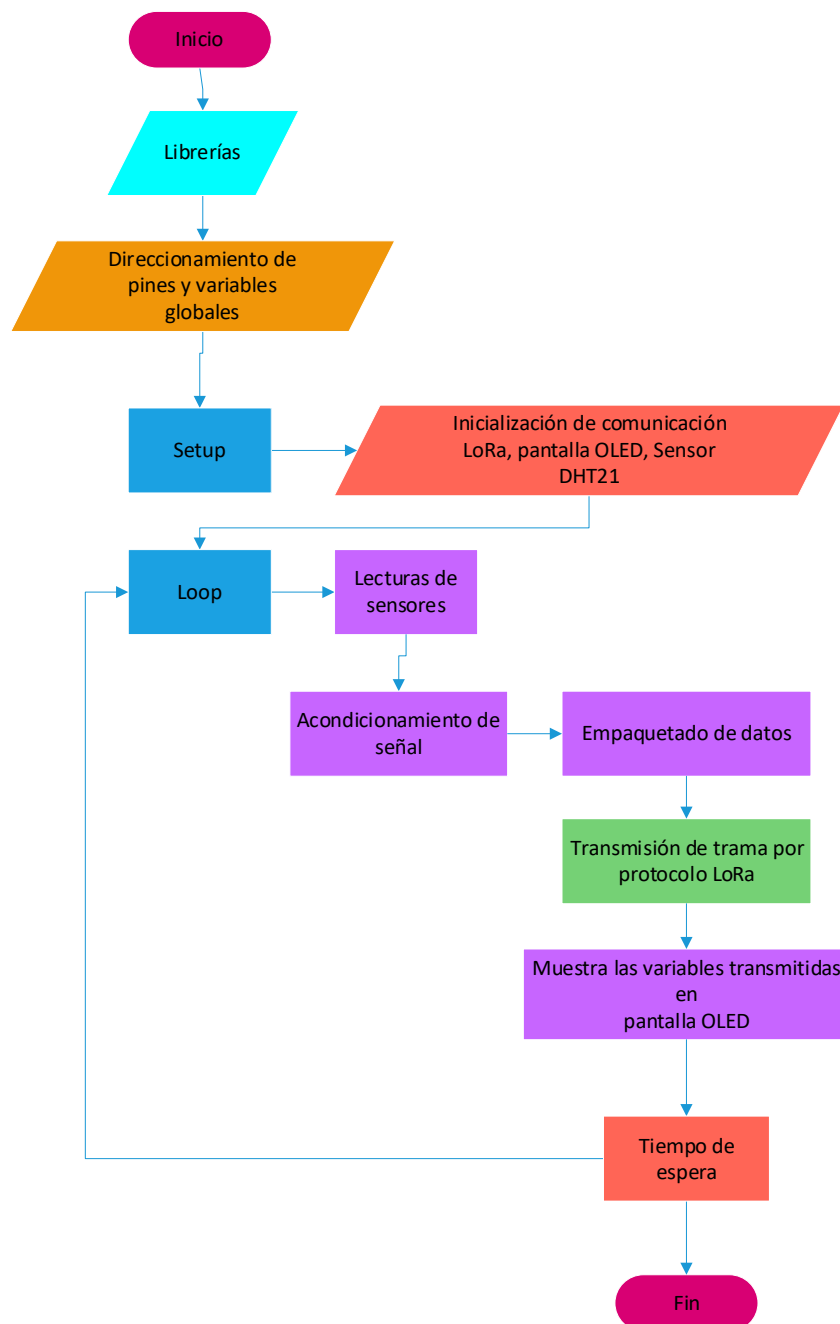
3.5. Diseño de Algoritmos de Control para los Nodos y Coordinador Central

En la Figura 48, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el nodo 1, para la adquisición de la señal de los sensores y transmisor con el protocolo LoRa.

El algoritmo se desarrolló en el IDE de Arduino, la estructura consta de librerías para acceso a la red LoRa, pantalla OLED, DHT21, etc.; direccionamiento de pines, variables globales; configuración e inicialización de comunicación como transmisor; lectura de temperatura y humedad, acondicionamiento de la señal, transmisión de datos cada 15 minutos y visualización de datos transmitidos en pantalla OLED.

Figura 48

Diagrama de flujo del algoritmo del nodo 1

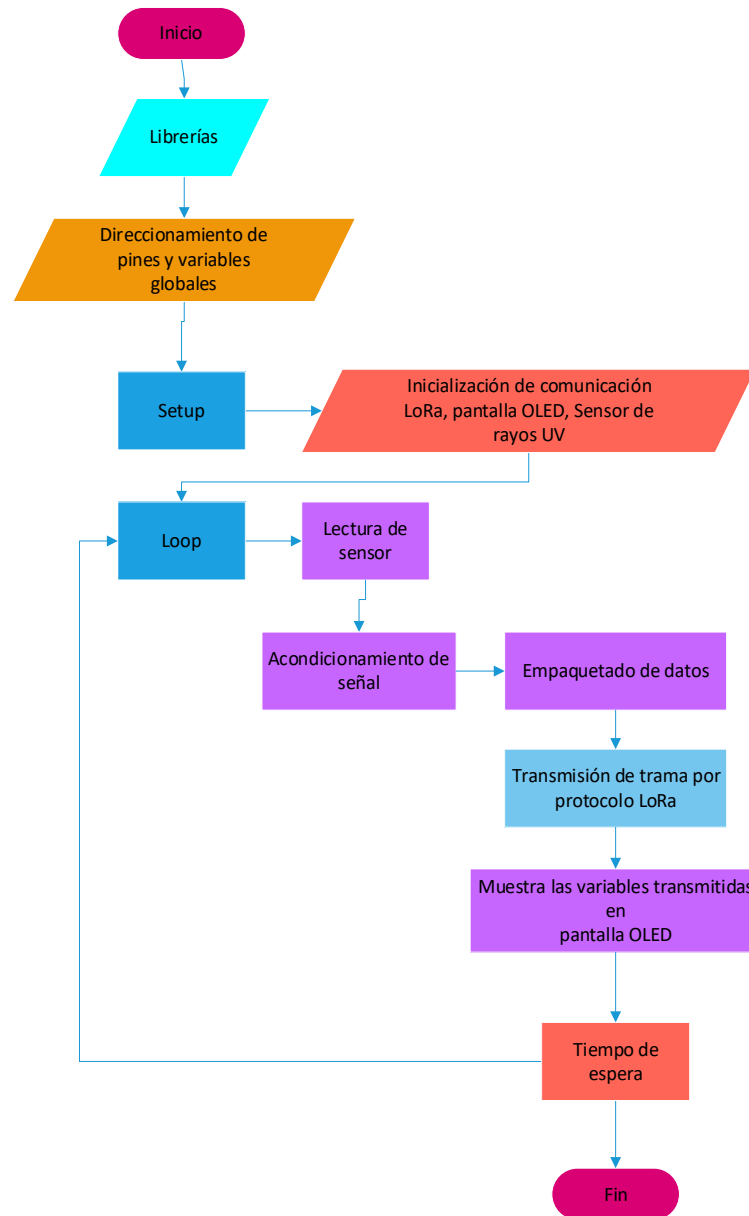


En la Figura 49, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el nodo 2, para la adquisición de la señal del sensor de radiación UV y transmisor con el protocolo LoRa.

La estructura consta de librerías para acceso a la red LoRa, pantalla OLED, etc.; direccionamiento de pines, variables globales; configuración e inicialización de comunicación como transmisor; lectura de sensor UV, acondicionamiento de la señal, transmisión de datos en lapsos de 15 minutos y visualización de variables transmitida en pantalla OLED.

Figura 49

Diagrama de flujo del algoritmo del nodo 2

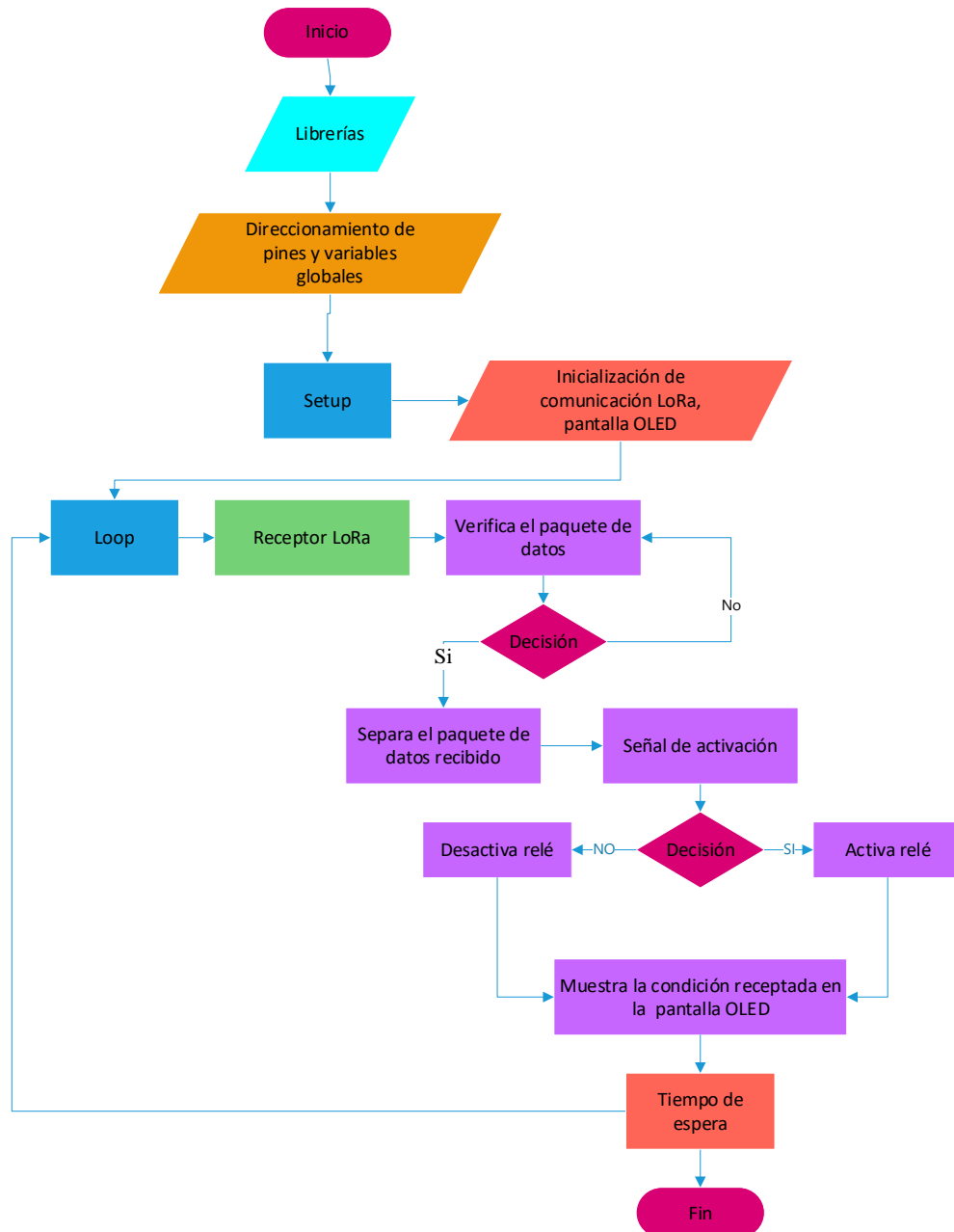


En la Figura 50, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el nodo 3, el cual recibe la señal de control del transmisor del módulo coordinador central.

La estructura consta de librerías para acceso a la red LoRa, pantalla OLED, etc.; direccionamiento de pines, variables globales; configuración e inicialización de comunicación como receptor LoRa, autenticación de la señal recibida, toma de decisión: activa o no el relé y visualización de resultado en pantalla OLED.

Figura 50

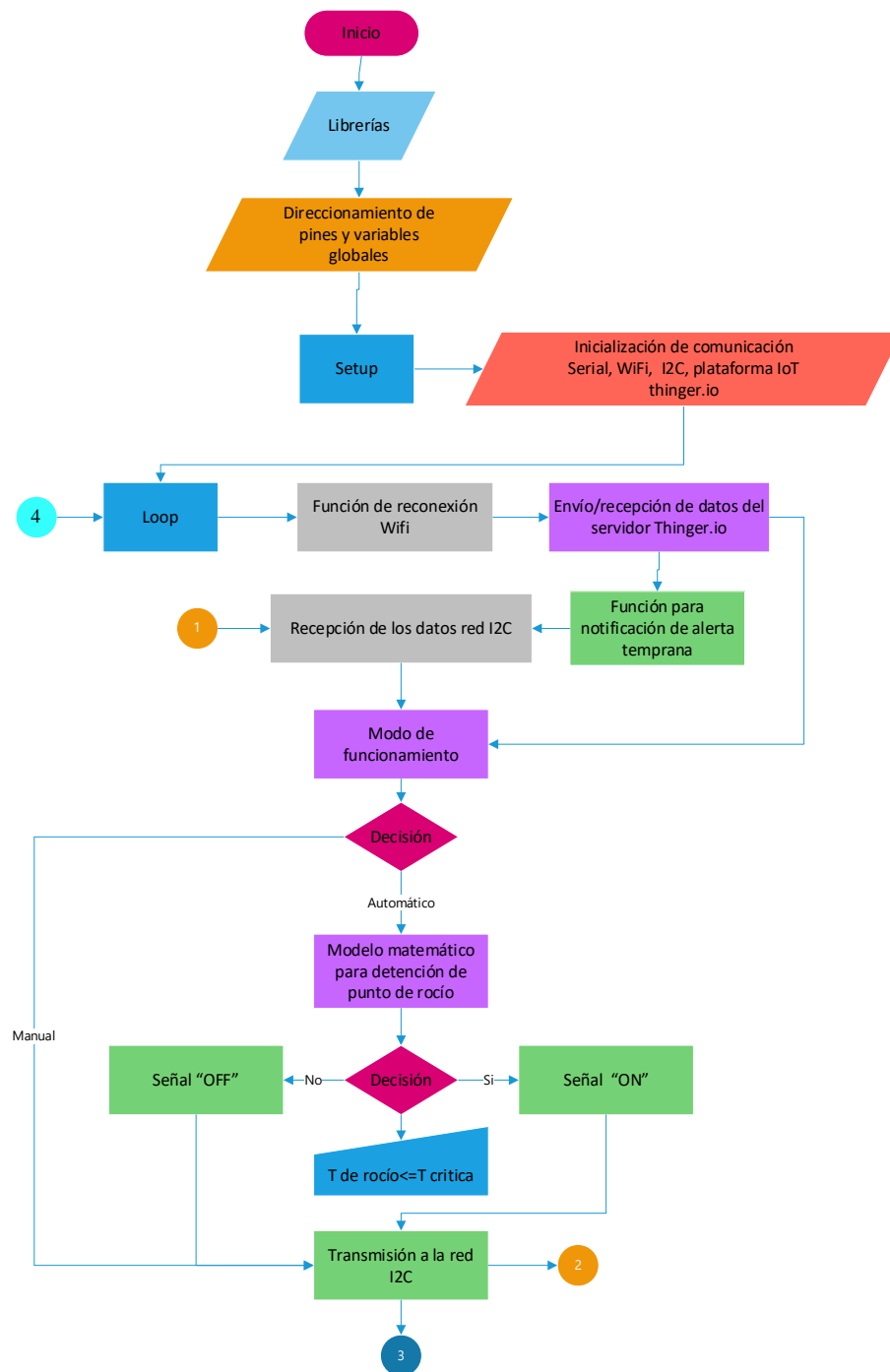
Diagrama de flujo del algoritmo del nodo 3

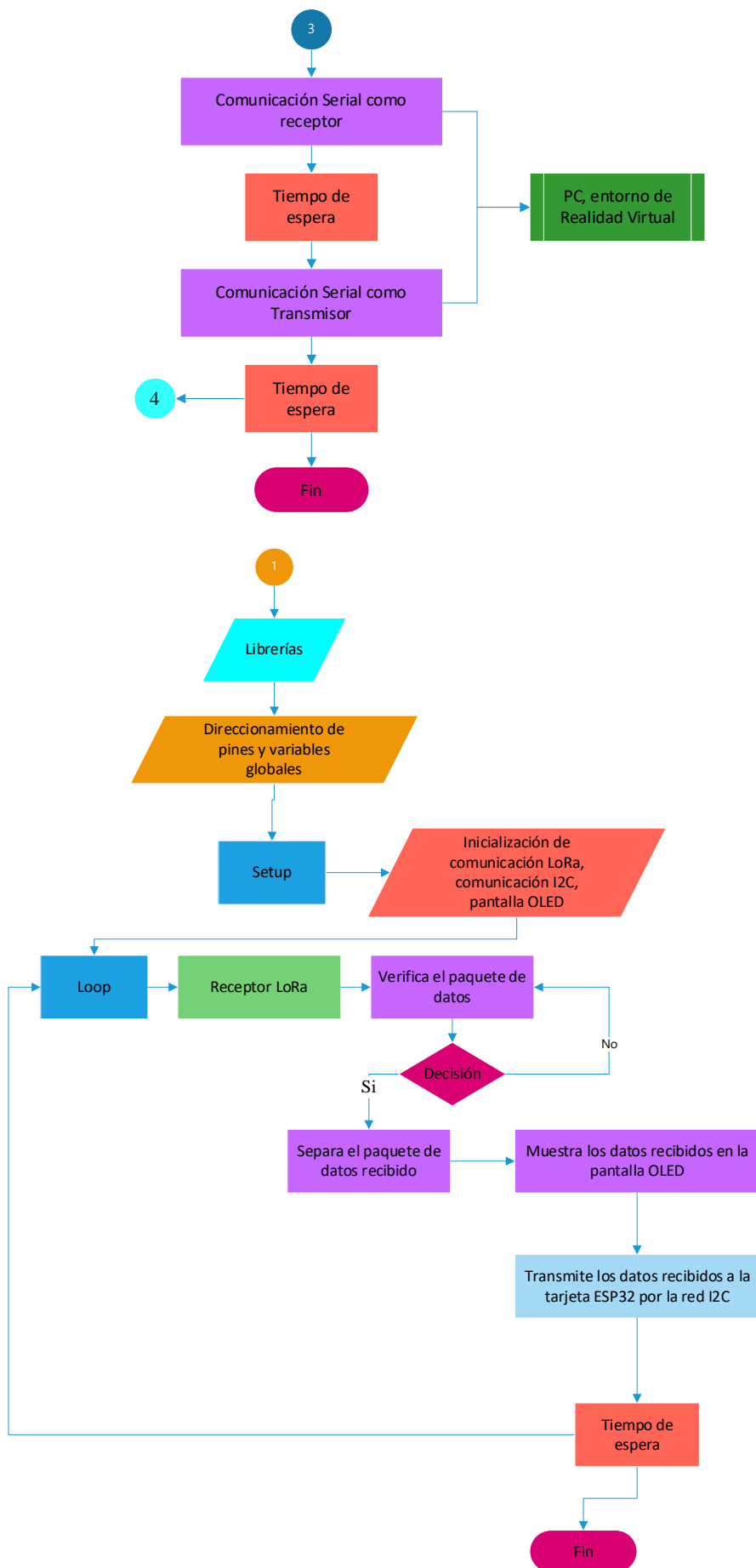


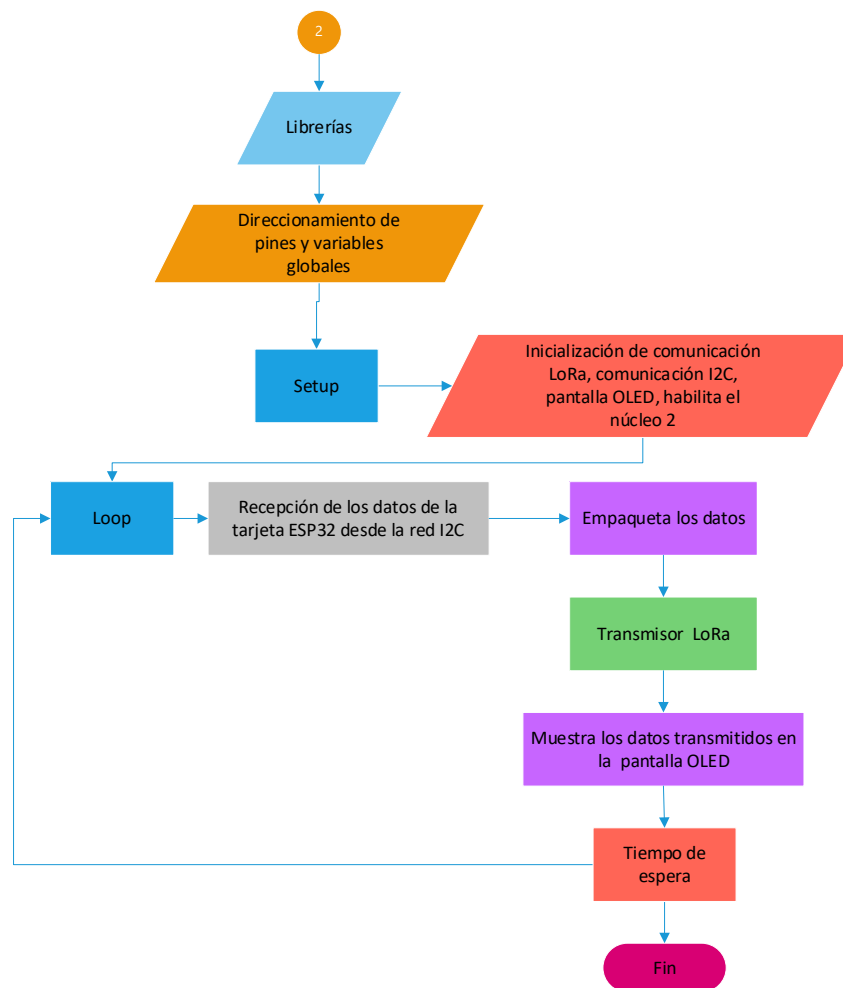
En la Figura 51, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el módulo coordinador central, el cual recibe los datos de la red de sensores y transmite la señal de control al nodo 3, se enlaza con la plataforma thinger.io y con la PC mediante comunicación serial en donde se encuentra el entorno de realidad virtual.

Figura 51

Diagrama de flujo del algoritmo del módulo coordinador central







3.6. Diseño del Entorno de Realidad Virtual

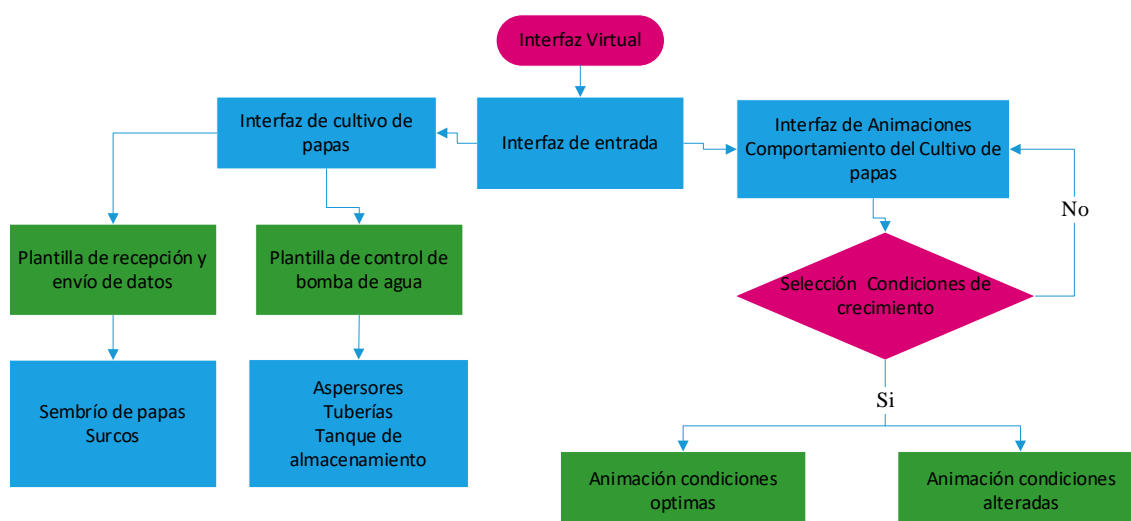
La Realidad Virtual (VR de acuerdo a sus siglas en inglés), es un entorno de escenas y objetos de apariencia real generado mediante tecnología informática, que crea en el usuario la sensación de estar inmerso en él (Miñarro, 2016).

Para la inmersión en dicho entorno, es a través de un dispositivo conocido como gafas o casco de Realidad Virtual. Gracias a la VR es posible sumergirse en videojuegos como personajes propios del entorno, para aprender a operar sistemas de monitoreo y control basados en agricultura inteligente.

La Figura 52, presenta el diagrama de flujo del entorno de realidad virtual, que consta de la virtualización del cultivo de papas y la interfaz de animación para simular el comportamiento fisiológico, mediante la combinación de parámetros como tipo de suelo, tipo de semilla y temperatura ambiente.

Figura 52

Diagrama de flujo del entorno virtual

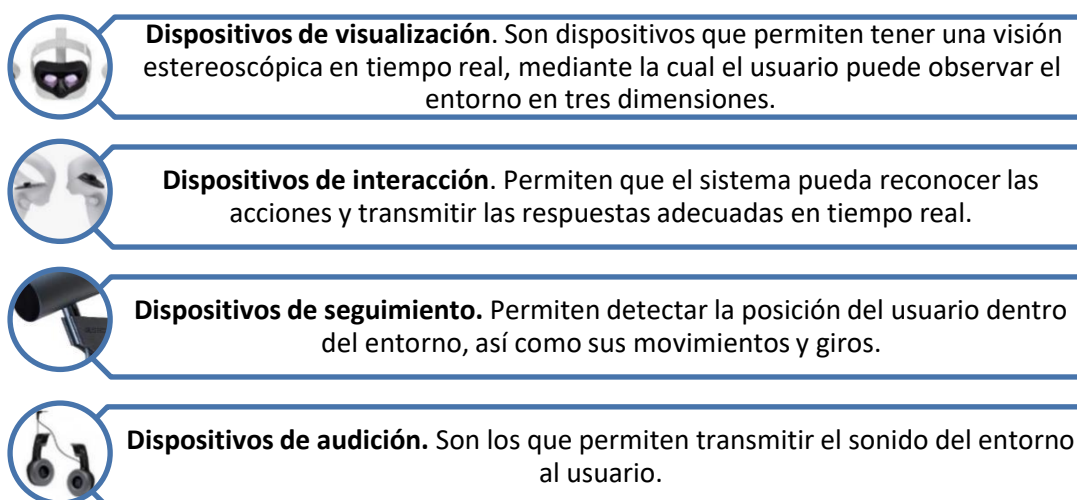


3.6.1. Elementos del Sistema de Realidad Virtual

El objetivo consiste en proporcionar al usuario la máxima sensación de libertad en la interacción, mediante la simulación de entornos reales, procesos de interacción naturales y respuestas del sistema en tiempo real (Prado Álvarez, 2021); Los sistemas de Realidad Virtual se dirigen a todos los sentidos del usuario mediante dispositivos de diferentes características, como se observa en la Figura 53.

Figura 53

Elementos del sistema de realidad virtual



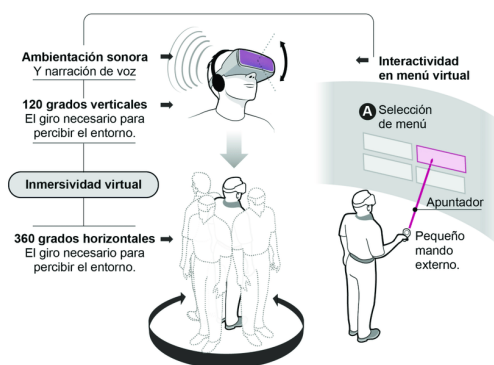
3.6.2. Dispositivo de Visualización e Interacción

Para la inmersión en el entorno de Realidad Virtual se utiliza las gafas “Oculus Quest 2”, que dispone de un sistema “standalone” (todo en uno).

El Oculus Quest 2, dispone de sensores dentro del casco lo que permite tener un sistema de inmersión virtual completo como se muestra en la Figura 54.

Figura 54

Inmersión Virtual con Oculus Quest 2



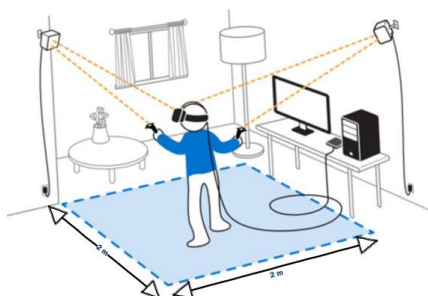
Nota. Adaptado de “Aplicación para Oculus Go basada en fósil de megafauna prehistórica como soporte a la divulgación del patrimonio paleontológico ecuatoriano” (p. 97), por Solórzano et al., 2019.

3.6.3. Espacio de Manipulación del Entorno VR

El espacio de movilidad debe ser de 2 x 2 metros en una habitación libre de obstáculos como lo indica la Figura 55.

Figura 55

Zona de manipulación y seguridad



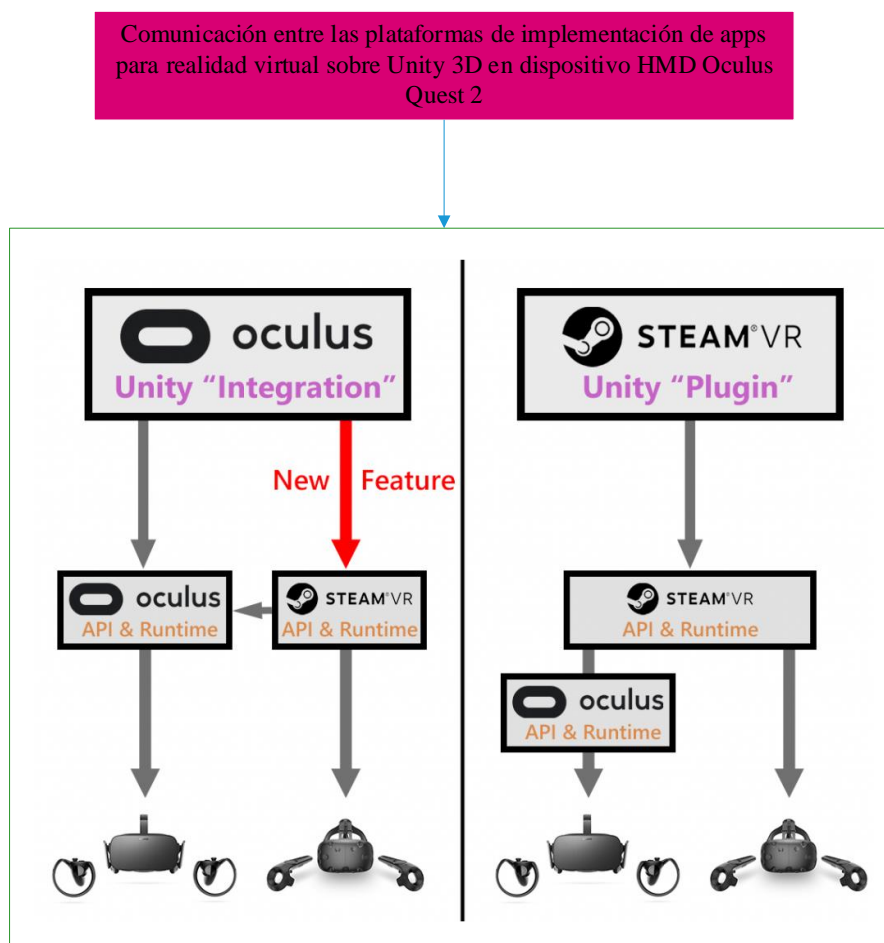
Nota. Tomado de Sercan Altundas (p. 14), Margus Luik, MSc, University of Tartu, 2018.

3.6.4. Integración del Entorno Virtual con el Dispositivo de Inmersión

La integración del entorno de Realidad Virtual con las gafas, se realiza a través de los softwares Api Steam VR, Unity 3D y Oculus Integration, como se muestra en la Figura 56.

Figura 56

Integración del entorno virtual con el dispositivo de inmersión



3.6.5. Delineación del Entorno de Realidad Virtual

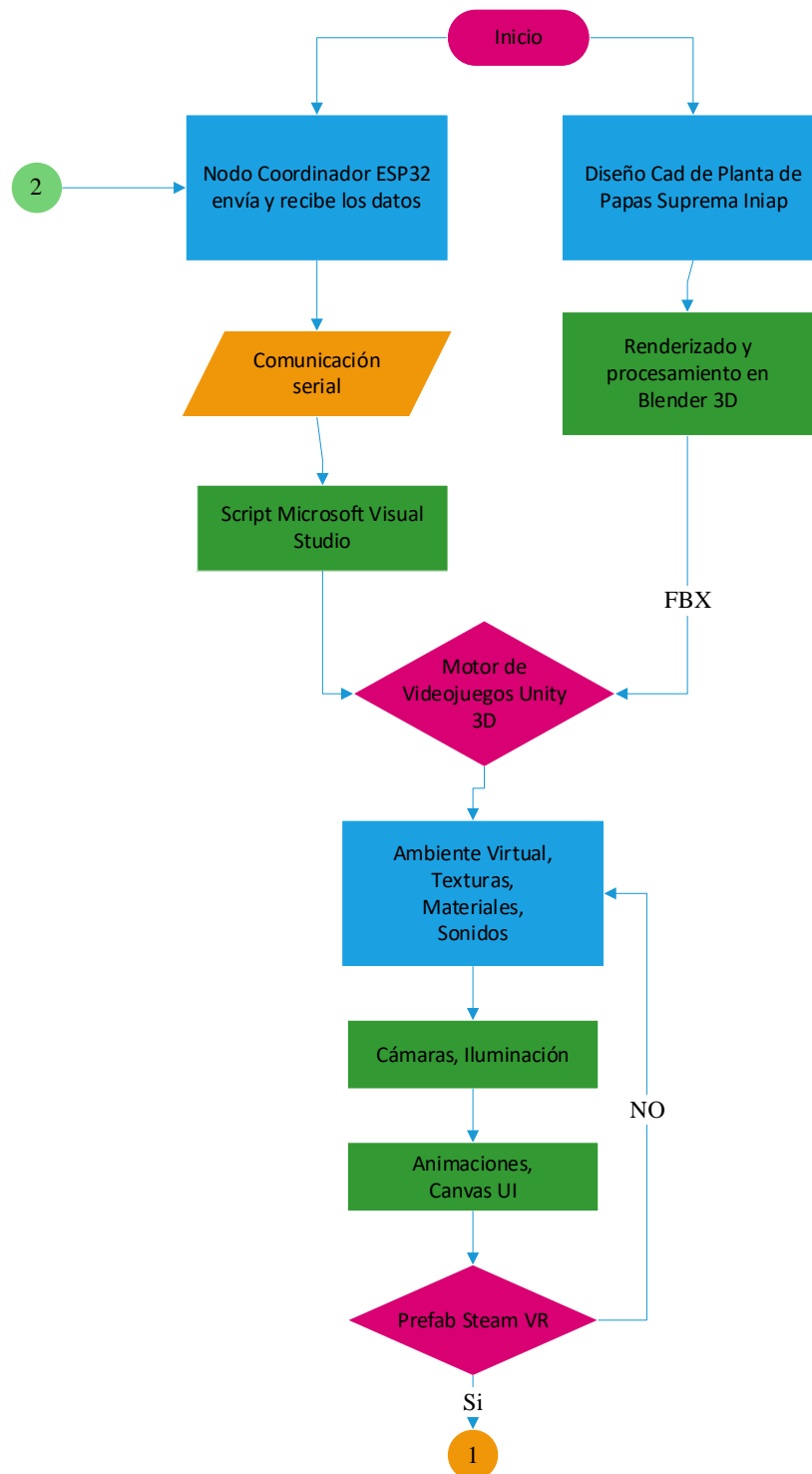
Para el diseño del entorno de VR, se definen las funcionalidades como la capacidad de visualizar las variables como: temperatura, humedad, radiación UV y accionar la bomba del sistema de aspersión; simular la fisiología de la papa INIAP-Suprema, combinando características como: tipo de semilla, tipo de suelo y temperatura ambiente.

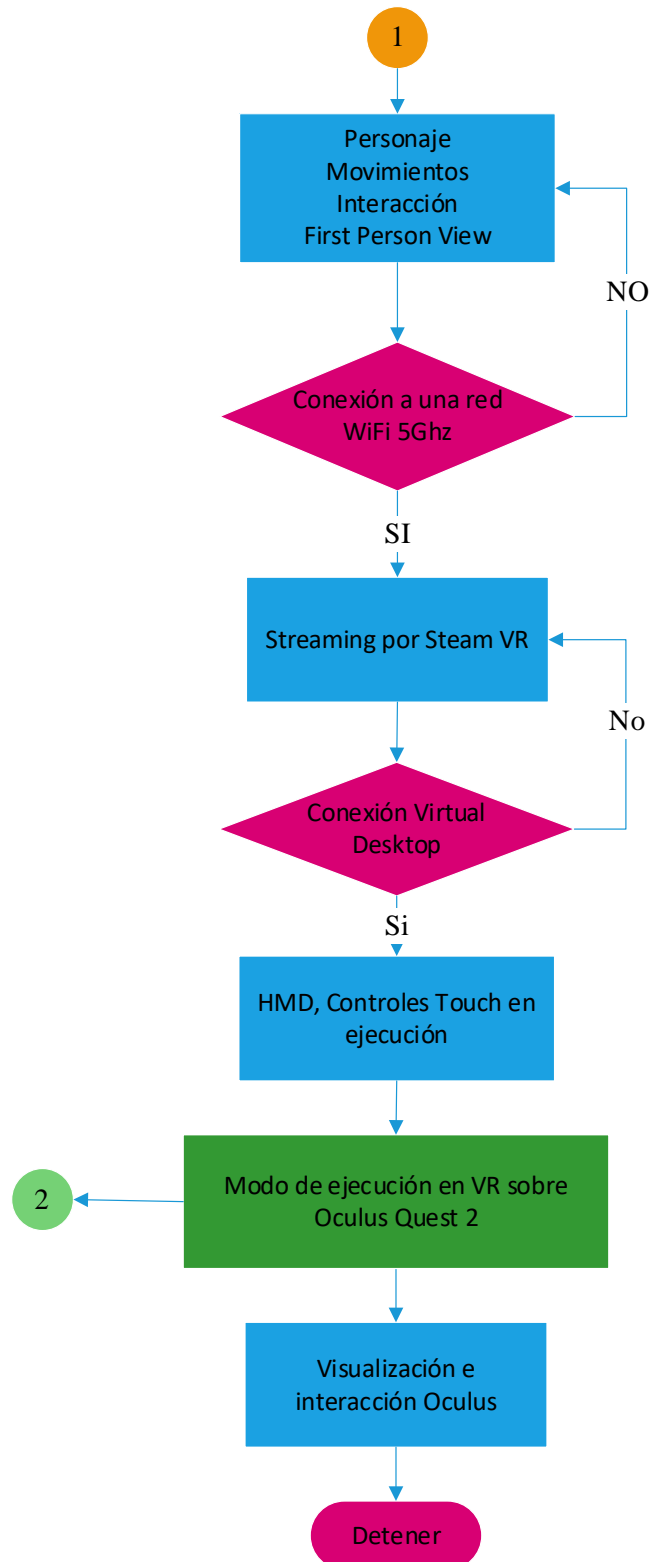
El diagrama de flujo de la Figura 57, muestra las funciones de recepción de datos desde el módulo coordinador central, el modelado de objetos tridimensionales son

exportados hacia la interfaz en Unity 3D para el desarrollo del entorno virtual y para inmersión se utiliza un dispositivo de realidad virtual Oculus Quest 2 mediante Steam VR por comunicación WiFi a 5Ghz.

Figura 57

Diseño del entorno de Realidad Virtual





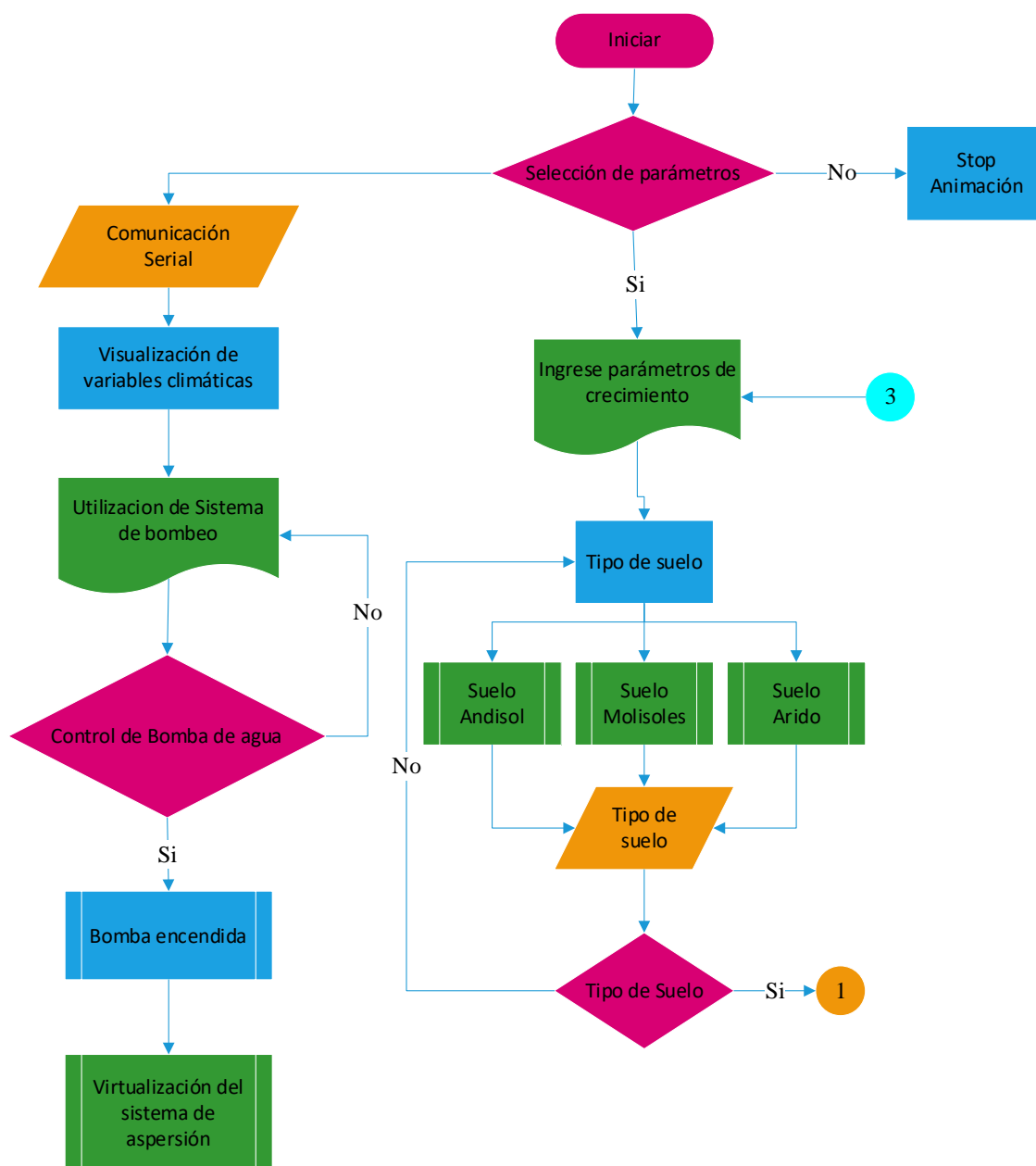
3.6.6. Diseño del Algoritmo del Entorno de Realidad Virtual

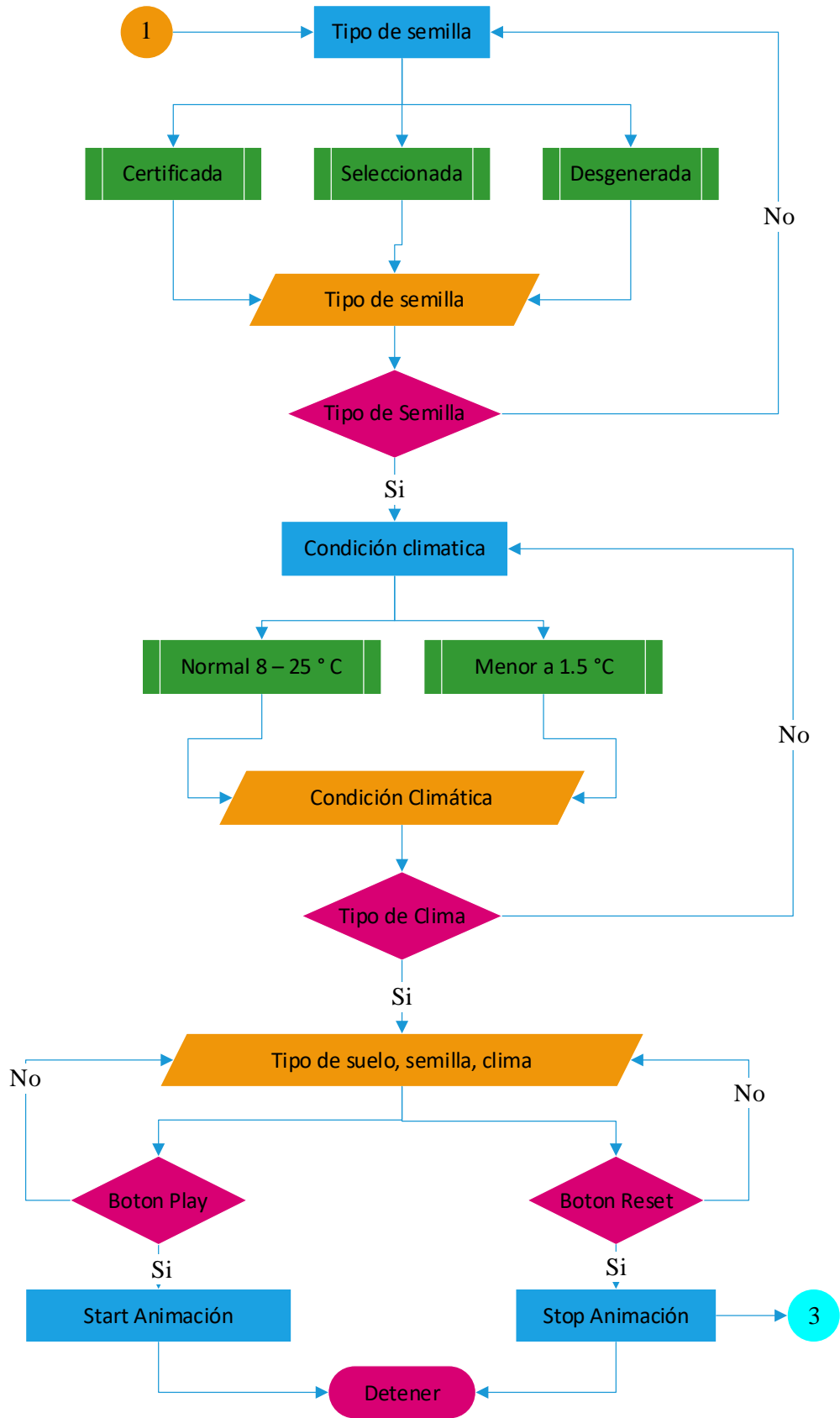
La Figura 58, presenta el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado en Visual Studio, que sustenta la funcionalidad del entorno virtual, desempeña las siguientes actividades: comunicación serial, visualización de variables climáticas como: temperatura,

humedad, radiación UV, control manual del sistema de bombeo y animaciones; simulación de la fisiología de la papa INEAP-Suprema, combinado las características de tipo de suelo, tipo de semilla y temperatura ambiente.

Figura 58

Diseño del algoritmo del entorno de realidad virtual



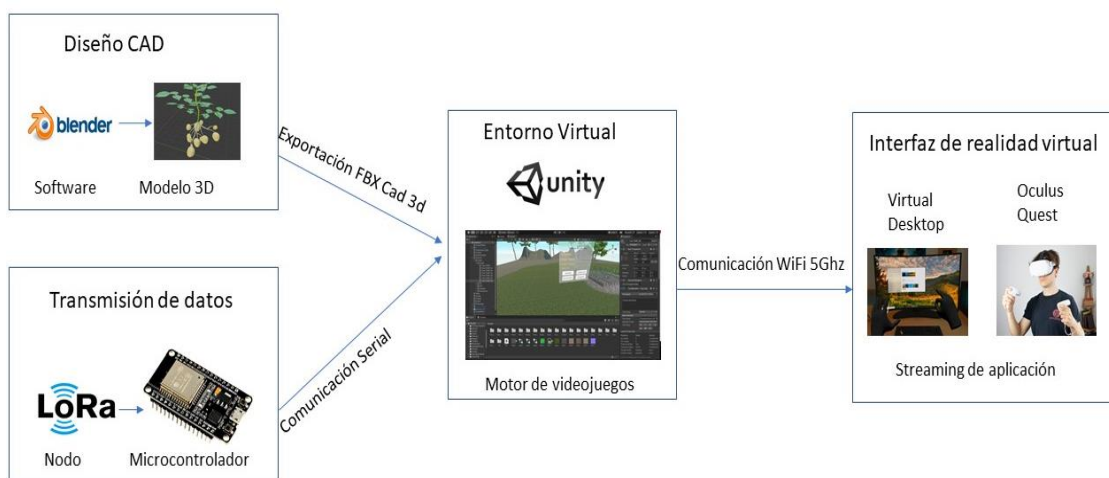


3.6.7. Disposición General del Entorno Virtual

El entorno está conformado por el diseño del escenario, la comunicación con los nodos sensores mediante el coordinador central, implementación del ambiente virtual dentro de un motor de video juegos, el interfaz de entrada y salida para el usuario. En la Figura 59, se presenta la disposición general.

Figura 59

Esquema general del entorno virtual



3.7. Diseño del Sistema de Alimentación Eléctrica con Energía Solar

El sistema de alimentación eléctrica para el accionamiento de una bomba de ½ hp se genera por medio de paneles solares, el tiempo promedio de funcionamiento por día es de 3 horas, por lo cual a continuación se presenta el dimensionamiento de la planta eléctrica.

Se prevé, que el sistema de bombeo funcione en su mayor parte en horas de la madrugada, y se recargue el banco de baterías en el transcurso del día.

3.7.1. Consumo energético estimado

Bomba de 1/2 Hp

Diámetro de salida: 1"

Caudal: 36 l/min

Voltaje: 120 V, motor monofásico

Revoluciones de operación: 3,600 RPM

El consumo energético (en kWh) de una bomba de agua, se puede obtener en función de su rendimiento global (η), del caudal suministrado (Q) y de la altura o presión de descarga (H), mediante la siguiente expresión:

$$C_{KWh} = \frac{Q \cdot H}{367 \cdot \eta} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Q : es el caudal suministrado por la bomba, en m^3/h

H : es la altura manométrica ganada por el agua a su paso por la bomba, es decir, la presión de impulsión del agua, expresado en metros (m).

η : es el rendimiento global de la bomba.

De la información técnica y de la curva de funcionamiento de la bomba, se obtiene el siguiente:

Caudal de suministro de la bomba (Q): 2.16 m^3/h

Altura de impulsión (H): 5 m

Rendimiento de la bomba en este punto de funcionamiento (η): 0,14

$$C_{KWh} = \frac{2.16 \cdot 5}{367 \cdot 0.14}$$

$$C_{KWh} = 0.210 \text{ KWh} \approx 210 \text{ Wh}$$

Multiplicando por dos para compensar potencia de arranque al inicio del bombeo.

$$P = 2 \cdot C_{KWh} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$P = 2 \cdot 210 \text{ W}$$

$$P = 420 \text{ W}$$

Se asume un consumo constante de 210 W, y un consumo de 420 W al arranque de la bomba.

3.7.2. Dimensionamiento de paneles solares para una bomba de $\frac{1}{2}$ hp.

P: Potencia de la bomba

Hp: Caballos de fuerza

$$1 \text{ Hp} = 745.7 \text{ W}$$

Haciendo la conversión para una bomba de 1/2 Hp a KW (Kilovatios)

$$P = (\text{Hp})(745.7\text{W})$$

$$P = \left(\frac{1}{2}\text{Hp}\right)(745.7\text{W}) = 372.85 \text{ W}$$

Potencia calculada: 372.85 W

Potencia real de la bomba: 210 W

$$\text{Número de paneles solares} = \frac{(\text{potencia nominal de la bomba})}{(\text{potencia del panel})} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Número de paneles solares} = (210)/(280)$$

$$\text{Número de paneles solares} = 0.75 \approx 1$$

Para la implementación se requiere un panel solar.

3.7.3. Dimensionamiento Banco de Baterías

Una bomba de ½ hp consume 210W en 30 min.

Se tiene una carga diaria de 420W máximo, un inversor de 24 Voltios, y se requiere una autonomía diaria de 3 horas.

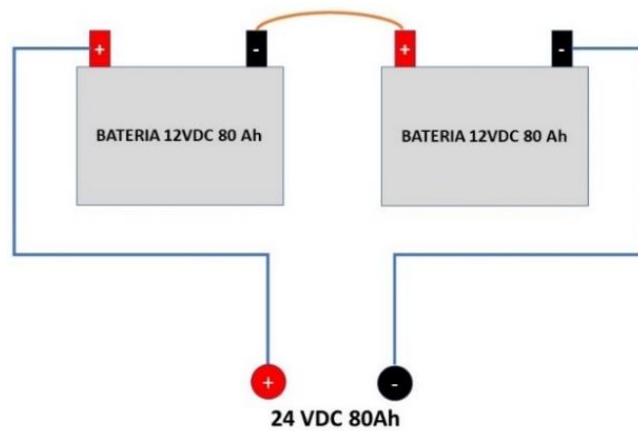
$$P = 420 * 1.8 \approx 750\text{W}$$

$$\text{Cantidad de amperios requeridos: } \frac{750 \text{ Watt}}{24 \text{ Voltios}} = 31.25 \text{ A} \quad \text{Ecuación 4}$$

Entonces 31.25 Amperios es la capacidad requerida mínima de una batería. En el mercado nacional disponen de baterías de 12 voltios a 80 Amperios/Hora, entonces se conecta dos baterías en serie, sumando el voltaje y la corriente se mantiene constante como se muestra en la Figura 60.

Figura 60

Configuración del banco de baterías



Por lo cual la potencia de salida es:

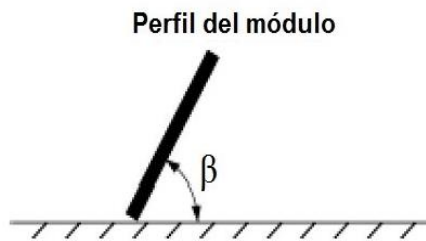
$$80 A \times 24 V = 1920 \text{ Watt al dia} \quad \text{Ecuación 5}$$

Se estima que la bomba consume 210 W constante en 30 minutos, por lo cual con el banco de baterías se tendría una autonomía de 4.57 horas, con una tasa de descarga del 100%, por lo cual se limita a una descarga del 70%, llegando a una autonomía de 3 horas.

3.7.4. Ubicación de la estación solar

Los paneles pueden estar situados en dirección sur o norte y la inclinación óptima dependerá de la latitud del lugar, de la época del año en que se quiere utilizar. Teniendo en cuenta que en alguna ocasión no es posible alcanzar las condiciones de inclinación y orientación adecuadas, habrá que evaluar, en todo caso, las pérdidas de radiación incidente debido a los condicionantes de ubicación (Irama et al., 2017).

No obstante, son admisibles unas desviaciones de hasta $\pm 20^\circ$, sin que se produzcan grandes pérdidas de rendimiento. En la Figura 61, se presenta el ángulo de inclinación $\beta = 15^\circ$, recomendado en Ecuador.

Figura 61*Inclinación del Panel Solar*

Nota. Adaptado de Tutorial instalación solar fotovoltaica para vivienda datos de partida [Fotografía], por YUBASOLAR, 2015.

3.7.5. Componentes del sistema de energía solar

Los componentes para la sinergia del sistema solar fotovoltaico para el bombeo se especifican a continuación:

- **Panel Solar 280W EAGLE 60 celdas:** es el encargado de transformar la energía del Sol en energía eléctrica (Abella,2005). Es un panel solar de conexión a red de gran rendimiento y calidad. Compuesto de células de silicio policristalino. Este panel solar tiene 60 celdas. Es capaz de proporcionar $1000W/m^2$ en condiciones de alta radiación. En la figura 62, se presenta el modelo del panel solar utilizado en el proyecto.

Figura 62*Panel Solar 60 celdas*

Nota. Adaptado de Jinkosolar- Eagle 60P 265-285 vatios modulo policristalino (p. 1), por Jinkosolar.

- **Regulador o controlador de carga:** este elemento es el encargado de proteger la batería contra sobrecargas o contra sobredescargas excesivas que podrían resultar dañinas para la batería, acortando su vida útil (Abella,2005). El controlador ayuda a maximizar el rendimiento energético de los paneles solares, permitiendo que funcione durante periodos de menor irradiación solar. En la figura 63, se presenta el modelo del controlador de carga utilizado en el proyecto.

Figura 63

Controlador de carga solar



Nota. Adaptado de Controladores de carga BlueSolar LCD&USB 12/24-5/10/20 (p.1), por victron energy – BLUE POWER.

- **Baterías:** se utiliza como sistema de almacenamiento energético, debido al desplazamiento temporal que puede existir entre los periodos de generación (durante el día) y los periodos de consumo (durante la noche), permitiendo la operación de las cargas (Abella,2005). Las baterías que se utilizan tienen las siguientes características:

- Voltaje nominal: 12 voltios
- Corriente: 80 Amperios

En la figura 64, se presenta el modelo de la batería utilizada en el proyecto.

Figura 64

Batería de ciclo profundo

Nota. Adaptado de Baterías Kaiser [Fotografía], por Baterías Kaiser.

- **Inversor DC/AC**, dispositivo que permite la conversión de la corriente continua (DC) generada en los paneles fotovoltaicos en corriente alterna (AC) para que pueda ser empleada por la bomba de agua, el inversor posee las características como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21

Características Inversor DC/AC

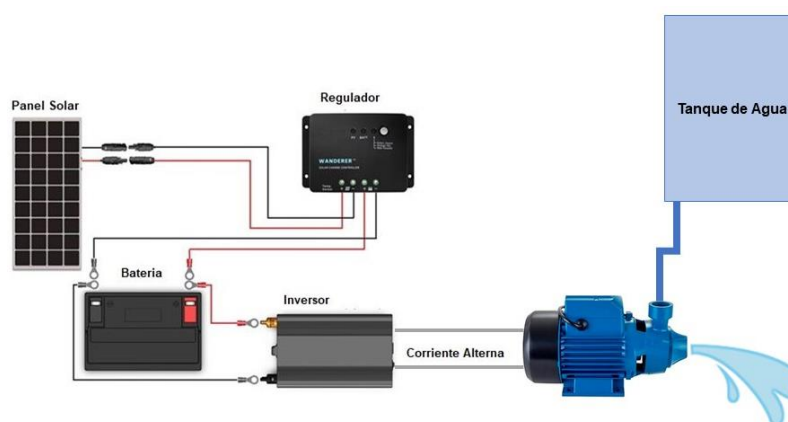
Datos Técnicos DC/AC	
Tensión de entrada	24 VDC
Voltaje de salida:	110V AC 60 Hz +- 2Hz
Potencia de salida:	1000W
Potencia pico:	2000w
Auto apagado con sobre carga:	30V
Auto apagado con batería baja:	20.V
Máxima eficiencia:	> 90%

3.7.6. Diseño del Sistema de Eléctrico

El diseño del sistema eléctrico solar fotovoltaica para el bombeo directo de agua está destinada a satisfacer las necesidades de consumo propio de electricidad para el accionamiento de la bomba de ½ hp. En la Figura 65, se presenta el esquema de instalación con los componentes principales.

Figura 65

Esquema del sistema de bombeo solar



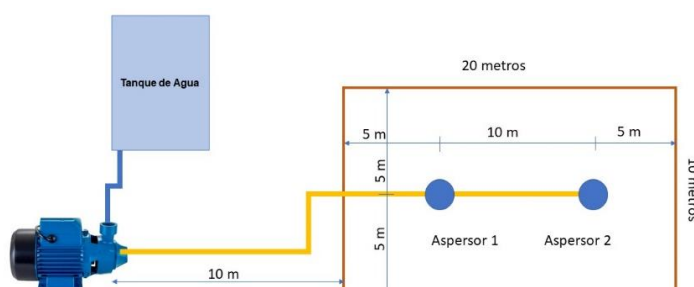
Se muestra que la dependencia del rendimiento de los módulos fotovoltaicos a la intensidad de la radiación solar, puede ser suplida por la instalación de un sistema de baterías de acumulación, de manera que la alimentación de corriente hacia la bomba se realice a través de ellas pasando por un inversor de DC/AC.

3.7.7. Emplazamiento de la Parcela de Riego

El objeto de este sistema es la generación de energía solar fotovoltaica que sirva para suministrar electricidad a una bomba de agua para el riego de un terreno con cultivo de papas en un área de 200 metros cuadrados, como se muestra en el esquema en la Figura 66.

Figura 66

Distribución de aspersores



La distribución de los aspersores para el riego se lo realiza uno a continuación de otro según la geometría del terreno lo cual permite cubrir la mayor área del cultivo.

3.8. Implementación

Mediante el método descriptivo se procede a la implementación del proyecto, se verifica el funcionamiento mediante la sinergia de los componentes de la red de sensores, módulo coordinador central, interfaz gráfica de usuario en thinger.io, entorno de realidad virtual, sistema de bombeo.

3.8.1. Redes de Sensores

La red de sensores se despliega en un área de cultivo de 200 metros cuadrados, propuesta en el capítulo III.

Los nodos deben ubicarse en un área abierta, para evitar interferencias con las señales que emiten los transmisores y el receptor.

Los nodos son ubicados a una altura de (0.3 a 0.5) metros sobre el nivel del cultivo de papas (FAO,2010), tomado en cuenta que pueden crecer hasta 1 metro de altitud, se estima la altura total de los soportes de los nodos de 1.5 metros medidos desde el suelo.

En la Figura 67, se presenta el nodo 1, dispositivo final que mide la temperatura del ambiente, la humedad relativa y la humedad de suelo.

Figura 67

Despliegue del nodo 1



En la Figura 68, se muestra el nodo 2, dispositivo final que mide la radiación UV, medido en un índice de 0 a 15.

El nodo debe estar ubicado en una zona abierta con una orientación (*sur 58° oeste*), como se muestra en la Figura 69.

Figura 68

Despliegue del nodo 2



Figura 69

Orientación del nodo 2



En la Figura 70, se muestra el nodo 3, dispositivo final que permite el control de un relé para activar o desactivar la bomba de agua con el paso de corriente y voltaje que suministra el inversor a través del sistema de energía solar, que se describe más adelante.

La señal de activación del nodo 3 depende de la humedad relativa y la temperatura ambiente del cultivo de papas, el cual las administra el módulo coordinador central “Gateway” que mediante el procesamiento con una función matemática emite la señal de activación o desactivación.

Figura 70

Despliegue del nodo 3



3.8.2. Módulo Coordinador Central

En la Figura 71, se implementa el módulo coordinador central “Gateway”, el cual se comunica con la red de sensores mediante el protocolo LoRa, el Gateway procesa los datos receptados de los nodos, los envía a la plataforma thinger.io (Figura 71a) y al computador (Figura 71b).

Figura 71

Implementación del módulo coordinador central



a) Comunicación plataforma IoT



b) Comunicación al PC

3.8.3. Plataforma Thinger.io

La interfaz de usuario en la Figura 72, permite visualizar las variables de la red de sensores como la temperatura, la humedad relativa, humedad de suelo, la radiación UV y el nivel de batería, se dispone de un interruptor para el modo de funcionamiento: en modo manual permite activar o desactivar la bomba de agua con el interruptor del nodo 3, en modo automático el módulo coordinador central por medio de un algoritmo matemático

determina si activa o desactiva la bomba del sistema de riego, las señales de control es enviada al nodo 3. También, se dispuso de un modo para activar las notificaciones de alerta temprana, el cual envía un mensaje de texto a Telegram cuando la temperatura ambiente es inferior a 4 °C, cómo se puede apreciar en la Figura 73.

Figura 72

Interfaz de usuario en plataforma Thinger.io

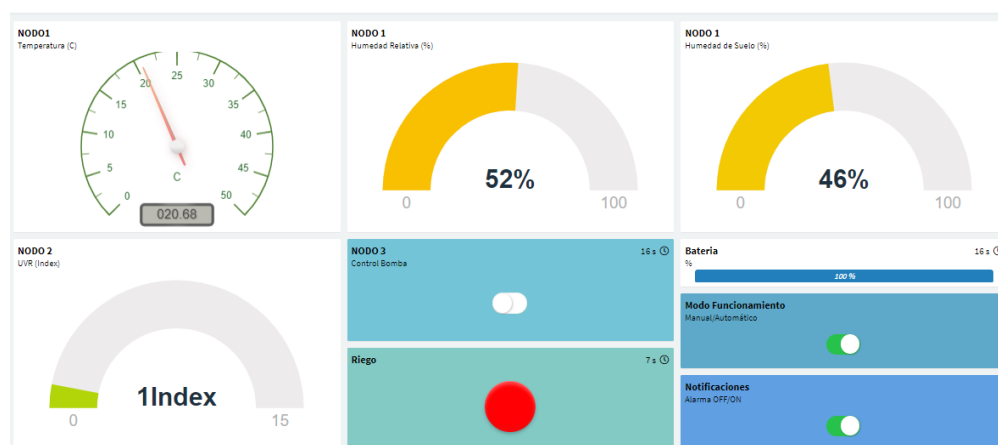


Figura 73

Notificaciones de alerta temprana



3.8.4. Entorno de Realidad Virtual

El dispositivo HMD (Head Mounted Display - monitor virtual de retina) permite visualizar e interactuar sobre los entornos virtualizados contribuyendo al entrenamiento de una persona al ámbito virtual, para la aplicación se utiliza un dispositivo Standalone que es

todo en uno como el “Oculus Quest 2”. En la Figura 74, se presenta la inmersión en el entorno de realidad virtual.

Figura 74

Oculus Quest 2, dispositivo de inmersión para el entorno de Realidad Virtual



La interfaz de realidad virtual, contiene los entornos y ambientes digitalizados y renderizados como el terreno, dispositivos de bombeo de agua, tanque de suministro, instalación de panel solar, sembrío y la información recibida del Gateway. En la Figura 75, se presenta el entorno de realidad virtual.

Figura 75

Interfaz de Realidad Virtual

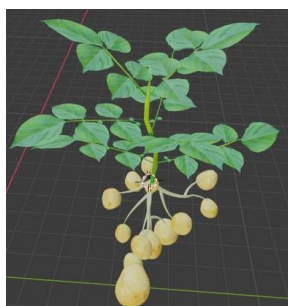


3.8.4.1. Comportamiento Virtual de la Papa INIAP-Suprema. El

comportamiento de la papa INIAP Suprema, en condición óptima presenta un color en las hojas verdes y la producción del tubérculo se aproxima a 1.36 kg por planta (Mastrocola et al, 2016). En la Figura 76, se presenta el comportamiento fisiológico de la papa en condiciones óptimas.

Figura 76

Virtualización de la planta de papas en condiciones normales



El comportamiento de la papa INIAP-Suprema, en condiciones pocas favorables presenta un color negro en las hojas y la producción del tubérculo disminuye o se pierde por completo, esto causado por bajas temperaturas (Chang et al., 2014). En la Figura 77, se presenta la papa cuando se somete a condiciones de bajas temperaturas (helada negra).

Figura 77

Virtualización de la planta de papas en condiciones poco favorables



3.8.5. Sistema de Energía Solar

Para la activación de la bomba de $\frac{1}{2}$ hp, se instala el panel solar orientada en dirección (*sur 58⁰ oeste*) para la incidencia de la radiación solar durante el transcurso del día. El panel solar es conectado a un controlador de carga, luego al banco de baterías en la

cual se conecta un inversor DC/AC para suplir energía eléctrica a la bomba de agua. En la Figura 78, se presenta el sistema eléctrico implementado.

Figura 78

Instalación de panel solar



En la Figura 79, se presenta al controlador de carga, es el encargado de regular el voltaje y el amperaje que suministra el panel solar al banco de baterías, permite controlar el estado de carga, evitando sobrevoltajes y averías en las baterías.

Figura 79

Controlador de carga solar



3.8.6. Sistema de Riego por Aspersión

Los aspersores son dispositivos finales para el riego en el cultivo mediante un movimiento rotativo.

Para el funcionamiento de los aspersores: son suministrados por un flujo constante de agua desde una bomba de $\frac{1}{2}$ hp con una tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada, permite rosear una superficie circular de 10 metros de diámetro en 30 segundos por vuelta. En la Figura 80, se presenta el sistema de aspersión en operación.

Figura 80

Funcionamiento del sistema de riego

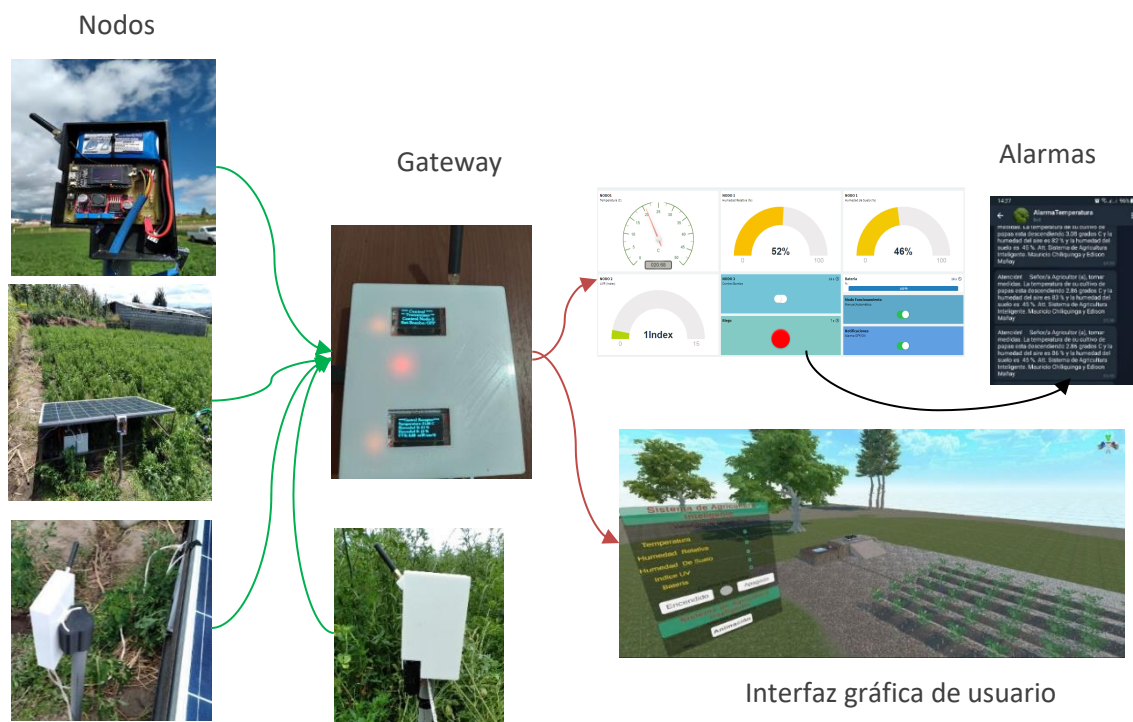


3.8.7. Sinergia del Sistema Implementado

El sistema implementado en el area de cultivo cuenta con los nodos sensores (temperatura, humedad, radiación UV), nodos de control, fuente de energia(panel solar, regulador de carga, baterias, inversor cables) y equipo de riego (bomba de agua de ½ hp, manguera de ¾ de pulgada, filtro antiretorno, aspersores). En la Figura 81, se presenta el sistema completamente operativo.

Figura 81

Sinergia del sistema de agricultura inteligente



Capítulo IV

4. Resultados del Sistema

Un sistema de agricultura inteligente engloba un amplio conjunto de funciones que permiten la mitigación de anomalías en los cultivos.

En el presente capítulo se expondrá la evaluación del sistema implementado en la comunidad de Chirinche Bajo en un área de 200 metros cuadrados de siembra. En base a las características del cultivo de papas, se establece los parámetros de puesta en marcha y parada del sistema de riego, aspectos climatológicos de la comunidad, análisis del estrés abiótico, eficiencia del proyecto, aspectos del entorno de Realidad Virtual y evaluación económica.

En la Tabla 22 y en la Figura 82, se presenta la zona de intervención:

Tabla 22

Zona de intervención

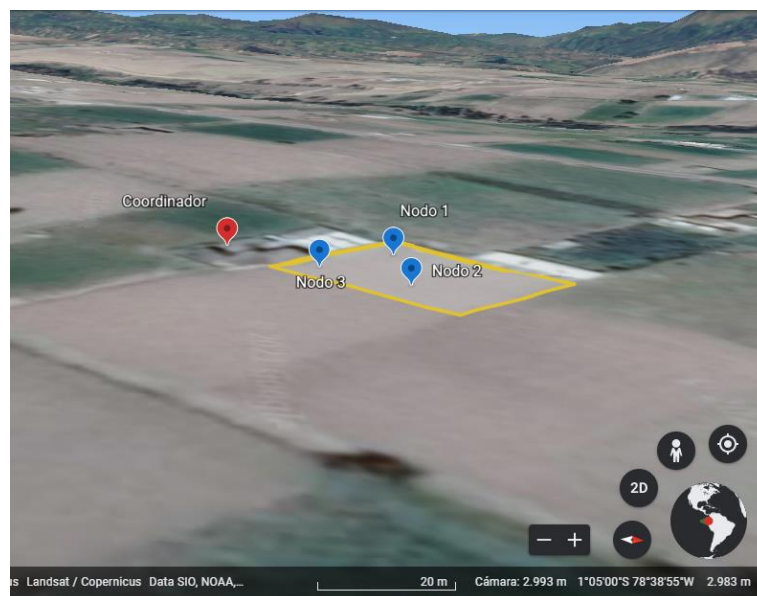
Lugar			
Provincia	Cantón	Parroquia	Comunidad
Cotopaxi	Salcedo	Mulalillo	Chirinche Bajo
Geolocalización			
Latitud:	-1.082956		
Longitud:	-78.648369		
Altitud:	2983m		
Cultivo seleccionado			
Papa INIAP-Suprema, principal cultivo de ciclo corto			
Tipo de riego a implementar			
Sistema por aspersión			
Cedula de cultivos			
Pasto, papa, cebolla, maíz			

En la Figura 82, se dispone la red de sensores que consta de 3 nodos finales, 2 para el monitoreo de variables como: temperatura, humedad, radiación UV; un nodo para el

control de la bomba de agua del sistema de riego y un módulo coordinador central para el enlace entre la red de sensores con la plataforma IoT y el entorno de Realidad Virtual.

Figura 82

Área de cultivo: red de sensores



Nota. Adaptado de Google Earth.

4.1. Parámetros de Cultivo de la Papa INIAP-Suprema

A continuación, se detallan los parámetros de cultivo de papas: como la temperatura, tipo de suelo, humedad, luz, áreas de cultivo.

4.1.1. Temperatura

El crecimiento de las raíces ocurre a temperaturas entre 10 a 35⁰C, el desarrollo más activo tendrá lugar a temperaturas entre 14 a 20⁰C.

El crecimiento del follaje ocurre a temperaturas entre 7 y 30⁰C, pero la temperatura óptima está entre 20 a 25⁰C.

Suelos fríos da mejor iniciación de tubérculos y en mayor cantidad. La temperatura óptima para la iniciación de tubérculos está entre 14 a 20⁰C (YARA, 2021).

La papa es considerada una planta termoperiódica, es decir, necesita una variación de las temperaturas entre el día y la noche.

La papa se siembra a principios de primavera en zonas templadas y a finales de invierno en regiones más calurosas (INTAGRI S.C., 2021).

4.1.2. Tipos de Suelo

Las papas se cultivan en suelos como Andisoles y Molisoles, que son suelos característicos de la zona Andina del Ecuador (SIGTIERRAS, 2017).

4.1.3. Tipo de Semilla

La semilla a nivel comercial se presenta: certificada, seleccionada (Cortez et al., 2002) y también existen de tipo degeneradas debido a varios ciclos de sembrío (Gómez et al., 2017)

4.1.4. Humedad

Los requerimientos hídricos varían entre 600 a 1000 *milímetros* de agua por ciclo de producción, lo cual dependerá de las condiciones climáticas. La producción es buena cuando la humedad del suelo se mantiene en un 70% y disminuye cuando es inferior al 50% de su capacidad disponible durante el período de crecimiento (La Torre, 2012).

4.1.5. Luz

El cultivo requiere bastante luminosidad. La cantidad de luz necesaria varía según la temperatura, por lo que, para una óptima producción, la papa requiere de periodos aproximadamente de 8 a 12 horas de luz solar.

4.1.6. Altitud.

El cultivo se desarrolla bien desde alturas mínimas de 1,700 hasta los 3,500 msnm.

4.2. Factores Abióticos en el Cultivo de Papa

La papa es susceptible a factores ambientales extremos, de humedad, temperatura y desbalances nutricionales que interrumpen el desarrollo normal del cultivo y limitan su producción (Pumisacho et al., 2002).

4.2.1. La Papa a Temperaturas Bajas

La papa ingresa en un estado de estrés a temperaturas inferiores a 0,8 °C y la planta muere a -2 °C. La papa es uno de los cultivos más sensibles y todos los años está en riesgo de perderse por las heladas. El efecto de la helada depende del estado de desarrollo de las plantas. Aquellas con brotes nuevos pueden recuperarse a través de una nueva brotación; plantas de más de 3 meses ya han formado una cantidad de tubérculos y se puede obtener cosecha, aunque los rendimientos serán inferiores; plantas crecidas de menos de 3 meses el daño es total y sin posibilidades de recuperación (Martinez et al, 2008).

4.2.2. Heladas

Las temperaturas críticas en la zona Andina, se efectúa entre las 3h00 y 6h00 de la mañana con temperaturas entre 1 a 5⁰C o inferiores en zonas de mayor altitud. Los efectos de las bajas temperaturas son generalmente más severos en las partes planas de los campos de cultivo.

Una helada negra ocurre bajo condiciones de aire excesivamente seco (cielo despejado y ausencia de viento). Cuando el fenómeno ocurre las hojas se marchitan y transforman a un color marrón oscuro.

Una helada blanca se produce cuando el punto de rocío es igual a la temperatura del ambiente, generalmente sucede cuando la humedad relativa llega al punto de saturación. Se evidencia este fenómeno cuando forma escarcha de color blanco en las hojas.

Los agricultores de la zona Andina han practicado métodos para reducir el efecto de la helada, como encender fogatas alrededor del cultivo en horas críticas, regar por aspersión o inundación (Pumisacho et al., 2002).

4.3. Riego por Aspersión para Protección ante Bajas Temperaturas

Consiste en equilibrar la pérdida de calor de las plantas mediante la provisión del calor de fusión del agua que se suministra con el riego. Al congelarse el agua desprende un calor equivalente a 80 calorías por gramo de agua. De esta forma se consigue que la temperatura

permanezca constante (muy próxima a 0° C), aunque es necesario mantener el riego mientras la temperatura del aire presente valores entre 0.5 a 1°C (Pino, 2009).

4.3.1. Aspersores por Encima del Cultivo

- El riego por aspersión sobre las plantas se utiliza para proteger cultivos de crecimiento bajo.
- Proporciona una protección contra las heladas hasta cerca de -7 °C si las tasas de aplicación son suficientes y la aplicación es uniforme.
- Son efectivos, si se humedecen con agua en ciclos de 30 a 60 segundos.
- Los cabezales de los aspersores deben montarse a 0.3 m o más altos por encima de la parte superior de la cubierta vegetal para prevenir que las plantas bloqueen la vaporización (FAO,2010).

4.3.2. Criterios para la Activación Automática del Sistema de Riego

Para la activación del sistema de protección se analiza aspectos, como el estado del ambiente con las mediciones de temperatura, humedad, radiación y mediante los siguientes parámetros:

- La humedad relativa inferior al 45% y una temperatura bajo los 0°C, ocasionan una helada negra, produciendo quemaduras en la planta, si la humedad relativa es mayor a 45% es considerado helada blanca “no letal para los cultivos”, sin embargo, si la humedad relativa es inferior al 60 % puede generar estrés en las plantas, cuando se presenta este fenómeno genera escarchas blancas en las hojas.
- Si en el día existe una radiación solar alta, más una humedad relativa alta, la cantidad de escarcha que se forme será mayor “helada blanca”.
- Si la radiación solar en el transcurso del día es alta y la humedad relativa estuvo por debajo del 45% la cantidad de escarcha será más baja o nula “helada negra”.

- Los rangos de temperatura en los que se ha producido heladas en la zona Andina son: temperatura máxima registrada -0.2°C , y la mínima registrada es de -4°C , con una duración aproximada de 3 horas (Cordero, 2013).

4.3.3. *Parámetros de Puesta en Marcha y Parada*

- La puesta en marcha y parada del sistema de riego por aspersión, depende de la variación de la temperatura ambiente y la humedad del cultivo, con relación a las temperaturas del punto de rocío.
- Los aspersores no deberían pararse a menos que la temperatura ambiente, esté por encima de la temperatura crítica del cultivo de papa.
- La temperatura de puesta en marcha debería fijarse 1°C o 2°C más alta que la temperatura crítica del cultivo de papa (FAO,2010).
- La temperatura del punto de rocío se estima a partir de la humedad relativa y de la temperatura del aire, ver Ecuación 6.

Nota. La temperatura del punto de rocío es directamente proporcional a la temperatura del aire, la temperatura de rocío es a la cual se debe enfriar el aire para que el vapor de agua se condense en rocío o escarcha.

$$T_d = \frac{237,3 \left(\frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{T_a}{237,3+T_a}}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{T_a}{237,3+T_a} \right)} \right)}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{T_a}{237,3+T_a} \right)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

T_d : Temperatura del punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

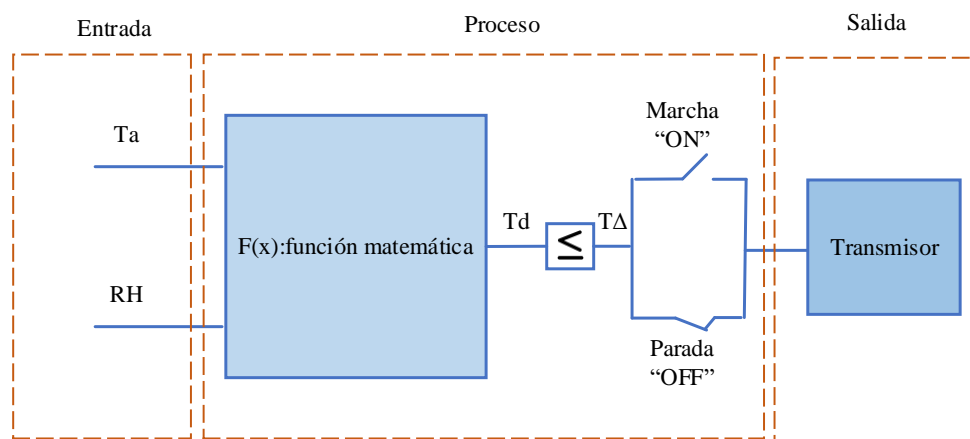
RH : Humedad relativa (%)

En base a los criterios de los párrafos precedentes se presenta la arquitectura de activación automática para la protección ante bajas temperaturas como se muestra en la Figura 83, la cual consta de entradas representadas por las variables que llegan de la red de

sensores que son procesadas mediante una función matemática (Ecuación 6) en el microcontrolador ESP32 para determinar la temperatura del punto de rocío y en base a los parámetros de cultivo se establece la salida del sistema de protección; se mantiene en parada o se pone en marcha.

Figura 83

Arquitectura de activación automática



4.3.4. Activación del Sistema: Tipificación de una Helada Negra

Temperatura crítica de la papa: $T_c = 0.8^{\circ}C$

Temperatura de ambiente: $T_a = T_c + T_{offset}$

$$T_a = 0.8^{\circ}C + 1^{\circ}C = 1.8^{\circ}C$$

Humedad relativa: $\%RH = 45\%$

Para determinar el punto de rocío se aplica la ecuación 6:

$$T_d = \frac{237,3 \left(\frac{\ln\left(\frac{45}{100}\right)}{17,27} + \frac{1.8}{237,3 + 1.8} \right)}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{45}{100}\right)}{17,27} + \frac{1.8}{237,3 + 1.8} \right)}$$

$$T_d = \frac{237,3(-0.04623 + 7.5282 \times 10^{-3})}{1 - (-0.04623 + 7.5282 \times 10^{-3})}$$

$$T_d = \frac{237,3(-0.03870)}{1 + 0.03870}$$

$$T_d = \frac{-9.1839}{1.0387} = -8.84^{\circ}C$$

Diferencia de temperatura ambiente con respecto a la temperatura de rocío:

$$T_{\Delta} = T_a - T_d$$

$$T_{\Delta} = 1.8^{\circ}C - (-8.84^{\circ}C) = 10.64^{\circ}C$$

Cuando la temperatura del aire se encuentra a $1.8^{\circ}C$ que es la temperatura crítica de referencia del cultivo de papas con una humedad relativa de 45%, la variación de temperatura del aire con respecto a la temperatura del punto rocío es de $10.64^{\circ}C$, se cataloga como helada negra, de manera que el sistema de protección, inicia a funcionar para prevenir el fenómeno.

4.3.5. Activación del Sistema: Tipificación de una Helada Blanca

Temperatura crítica de la papa: $T_c = 0.8^{\circ}C$

Temperatura de ambiente: $T_a = T_c + T_{offset}$

$$T_a = 0.8^{\circ}C + 1^{\circ}C = 1.8^{\circ}C$$

Humedad relativa: %RH = 100%

$$T_d = \frac{237,3 \left(\frac{\ln\left(\frac{100}{100}\right)}{17,27} + \frac{1.8}{237,3 + 1.8} \right)}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{100}{100}\right)}{17,27} + \frac{1.8}{237,3 + 1.8} \right)}$$

$$T_d = \frac{237,3(0 + 7.5282 \times 10^{-3})}{1 - (0 + 7.5282 \times 10^{-3})}$$

$$T_d = \frac{1.786}{0.9924} = 1.8^{\circ}C$$

Cuando la temperatura de rocío es igual a la temperatura ambiente, sucede cuando la humedad relativa llega al punto de saturación (RH100%), se considera una helada blanca “no letal”, si el punto de rocío es superior a la temperatura crítica de cultivo de papas, el sistema de protección no realizara ninguna acción.

Humedad relativa: %RH = 50%

$$T_d = \frac{237,3 \left(\frac{\ln\left(\frac{50}{100}\right)}{17,27} + \frac{1,8}{237,3 + 1,8} \right)}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{50}{100}\right)}{17,27} + \frac{1,8}{237,3 + 1,8} \right)}$$

$$T_d = \frac{237,3(-0,0401 + 7,5282 \times 10^{-3})}{1 - (-0,0401 + 7,5282 \times 10^{-3})}$$

$$T_d = \frac{-7,73}{1,03257} = -7,48^{\circ}C$$

Diferencia de temperatura ambiente con respecto a la temperatura de rocío:

$$T_{\Delta} = T_a - T_d$$

$$T_{\Delta} = 1,8^{\circ}C - (-7,48^{\circ}C) = 9,28^{\circ}C$$

Humedad relativa: %RH = 60%

$$T_d = \frac{237,3 \left(\frac{\ln\left(\frac{60}{100}\right)}{17,27} + \frac{1,8}{237,3 + 1,8} \right)}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{60}{100}\right)}{17,27} + \frac{1,8}{237,3 + 1,8} \right)}$$

$$T_d = \frac{237,3(-0,02957 + 7,5282 \times 10^{-3})}{1 - (-0,02957 + 7,5282 \times 10^{-3})}$$

$$T_d = \frac{-5,23}{1,02204} = -5,11^{\circ}C$$

Diferencia de temperatura ambiente con respecto a la temperatura de rocío:

$$T_{\Delta} = T_a - T_d$$

$$T_{\Delta} = 1,8^{\circ}C - (-5,11^{\circ}C) = 6,9^{\circ}C$$

Si la temperatura del aire se encuentra a $1,8^{\circ}C$ que es la temperatura crítica del cultivo de papas con una humedad relativa de 60%, la variación de temperatura del aire con respecto a la temperatura del punto rocío es de $6,9^{\circ}C$, se cataloga como helada blanca, ya que, existe una diferencia entre T_a y T_d de $6,9^{\circ}C$, se considera que el sistema de protección inicie a funcionar para prevenir el fenómeno.

Por lo tanto, se considera que el sistema de agricultura inteligente para la protección ante temperaturas bajas en el cultivo de papas se active cuando la diferencia entre la temperatura del aire con respecto a la temperatura de rocío sea mayor que 6.9°C y la humedad relativa menor o igual al 60%.

4.3.6. Aplicación de Caudal

En base a la aproximación descrita por Campbell y Norman (1998) y un modelo teórico de caudales de aspersión de Gerber y Martsof (1979) en (FAO, 2010), resulta una ecuación para determinar la velocidad del caudal del aspersor (R_A), en términos de la velocidad del viento de $0.1 \leq u \leq 5 \text{ m s}^{-1}$, y la temperatura del aire (T_a en $^{\circ}\text{C}$), viene dada por:

$$R_A = (T_a - 1.4458 u^{-0.4568})(0.0538 u^2 - 0.5404 u - 0.4732) \text{ mm h}^{-1} \quad \text{Ecuación 7}$$

Datos:

Velocidad media del viento, referenciado de (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2017), estación meteorológica Rumipamba – Salcedo.

Velocidad media (km/h): $6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \Rightarrow 1.66 \text{ m s}^{-1}$

Temperatura: 0°C

Tiempo de rotación del aspersor: 30 segundos

$$R_A = (0 - 1.4458 (1.66)^{-0.4568})(0.0538 (1.66)^2 - 0.5404 (1.66) - 0.4732) \text{ mm h}^{-1}$$

$$R_A = (0 - 1.147)(0.148 - 0.897 - 0.4732) \text{ mm h}^{-1}$$

$$R_A = (0 - 1.147)(-1.22) \text{ mm h}^{-1} = 1.40 \text{ mm h}^{-1} \approx 1.4 * 10^{-3} \text{ m h}^{-1}$$

4.3.7. Tasas de Aplicación de Caudal

Se determina el caudal utilizado por el aspersor, mediante la ecuación 7:

$$Q = R_A * A \quad \text{Ecuación 8}$$

Área de cobertura del aspersor: $A = 100 \text{ m}^2$

$$Q = (1.4 * 10^{-3} \text{ m h}^{-1}) * (100 \text{ m}^2) = 0.14 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \approx 2.33 \text{ lt/min}$$

Se determina que en 100 m^2 de cultivo, un aspersor consume 2.33 litros por minuto, por lo tanto, en 200 m^2 consumirá un caudal de 4.66 litros por minuto.

Se estima que el sistema de riego para la protección ante bajas temperaturas opere durante 3 horas en el cual absorberá un caudal de 838.8 litros.

4.4. Factores Climáticos en la Comunidad Chirinche Bajo

4.4.1. La Temperatura y Humedad Relativa

El comportamiento térmico, según las variables monitoreadas con la red de sensores en algunos días del mes de junio y julio, se presenta en la Tabla 23:

Tabla 23

Temperatura, humedad relativa y temperatura del punto de rocío

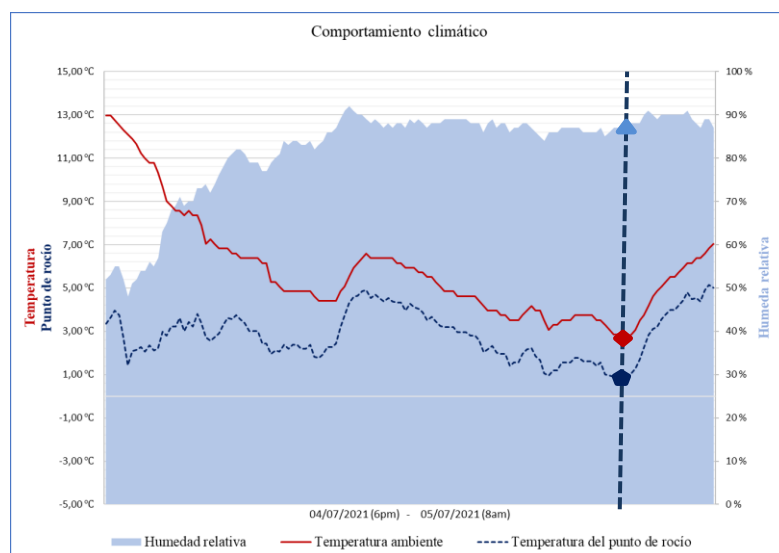
N.	Fecha	Temperatura	Humedad	Temperatura del punto de rocío
	d/m/a	°C	%	°C
1	23/06/2021	9	90	7,45
2	24/06/2021	6,38	89	4,70
3	25/06/2021	6,59	90	5,07
4	26/06/2021	6,82	85	4,48
5	27/06/2021	5,00	99	4,86
6	28/06/2021	9,23	93	8,16
7	01/07/2021	6,82	91	5,46
8	02/07/2021	5,00	93	3,96
9	03/07/2021	7,26	88	5,41
10	04/07/2021	3,96	90	2,47
11	05/07/2021	2,64	87	0,70
12	06/07/2021	2,85	82	0,09
13	07/07/2021	5,94	85	3,62
14	10/07/2021	9,23	95	8,47
15	11/07/2021	8,8	93	7,73
16	13/07/2021	8,8	94	7,89
17	14/07/2021	5,5	93	4,46
18	15/07/2021	5,72	87	3,73
19	16/07/2021	7,7	89	6,00
20	17/07/2021	9,9	91	8,50
21	18/07/2021	9,02	95	8,26
22	19/07/2021	8,8	96	8,20

En la tabla 23, se evidencio que en las madrugadas de 3 días hubo temperaturas inferiores a 5°C.

En la Figura 84, se presenta la variación térmica del día 5 de julio.

Figura 84

Comportamiento climático: 5 de julio

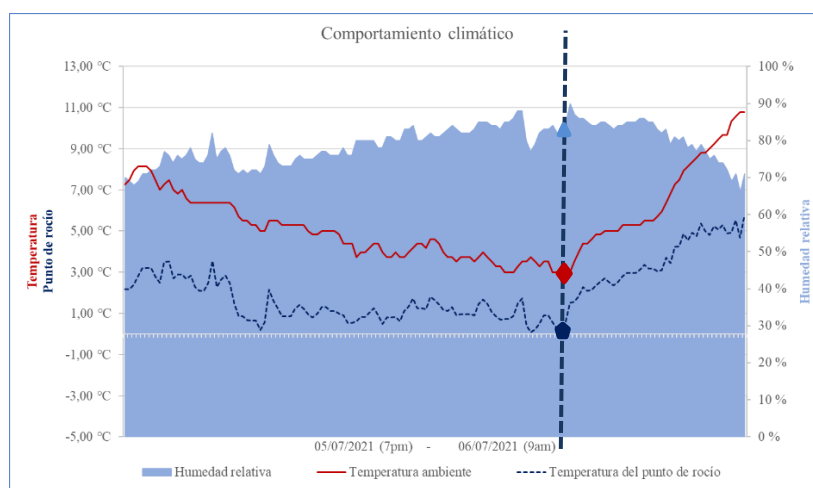


Nota. Se confirma que en la madrugada del día 5 de julio a las 6:06 am, la temperatura descendió \blacklozenge ($T_a = 2,64 \text{ }^\circ\text{C}$), con una humedad relativa \blacktriangle ($RH = 87\%$) y el punto de rocío llegando a \blacklozenge ($T_d = 0,70 \text{ }^\circ\text{C}$).

En la Figura 85, se presenta la variación térmica del día 6 de julio.

Figura 85

Comportamiento climático: 6 de julio



De la Figura 35, se corrobora que en la madrugada del día 6 de julio a las 4:58 am, la temperatura descendió \blacklozenge ($T_a = 2,85$ °C), con una humedad relativa \blacktriangle ($RH = 82\%$) y el punto de rocío llegando a \blacklozenge ($T_d = 0,09$ °C).

4.4.2. Humedad del Suelo





Los tipo de suelo Andisoles y Molisoles que son característicos de la zona Andina del Ecuador son adecuados para el cultivo de papas, la humedad de los suelos depende de los recursos hídricos disponibles y de las lluvias que pueden haber en el transcurso del año, en la comunidad de Chirinche Bajo, el riego se ejecuta a través de turnos rotativos cada 8 días, el cual provee de una humedad del 90% medida en la planta y disminuye paulatinamente a un 60% en el transcurso de la semana o inferior si en los días hace un calor intenso, cabe destacar que en gran medida se requiere de lluvias para mantener una humedad favorable de 60 a 70% en los cultivos de papa INIAP-Suprema.

4.4.3. Índice Ultravioleta (IUV)

Según la Organización mundial de la salud el IUV, es una medida estandarizada de la intensidad de la radiación UV sobre la superficie terrestre que se relaciona con los efectos sobre la piel humana. En la Tabla 24, se presenta las categorías de exposición que va desde baja hasta extremadamente alta, relacionadas con intervalos de valores enteros y sus respectivos códigos de colores establecidos por la OMS.

Tabla 24

Índice Ultravioleta: categorías de exposición




Categorías	Valores	Colores
Baja	<2	
Moderada	3-5	
Alta	6-7	
Muy alta	8-10	
Extremadamente alta	>11	

Nota. Adaptado de INAMHI monitor UV – Simbología general [Fotografía], por INAMHI,2021.

La Tabla 25, presenta las recomendaciones de protección ante la exposición UV.

Tabla 25

Recomendaciones de protección a UV

Tabla de recomendaciones	
	Índice [1 - 2]
	Puede permanecer en el exterior sin riesgos.
	Índice [3 - 7]
	Póngase camisa, crema de protección solar, sombrero y gafas de sol
	Índice [mayor a 8]
	Son imprescindibles camisa, crema de protección solar, sombrero y gafas de sol

Nota. Adaptado de INAMHI monitor UV – Tabla de recomendaciones [Fotografía], por INAMHI,2021.

4.4.3.1. La Radiación Solar en los Cultivos de Campo Abierto. El sol es fuente de vida y energía, sin embargo, cuando su radiación es excesiva y no se toman las precauciones adecuadas, los cultivos pueden dañarse irremediablemente.

La luz solar es utilizada en las plantas para producir carbohidratos a partir de dióxido de carbono y agua, lo que ayuda a que crezcan más fuertes y sanas. Sin embargo, cuando la luz no es suficiente, y las condiciones climáticas son adversas, su crecimiento y desarrollo se dificulta (Camponectado, 2019).

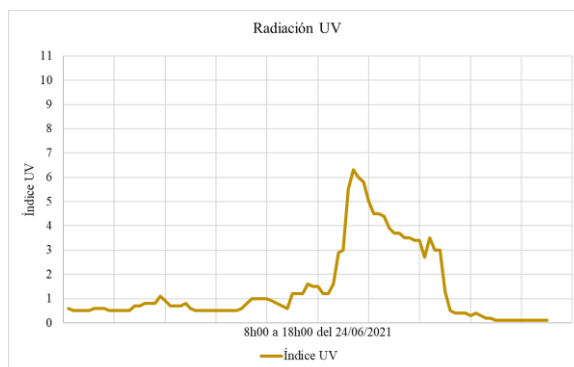
Para prevenir posibles problemas en el desarrollo del cultivo de papas, es importante el monitoreo de la radiación UV. En la Tabla 26, se presenta el índice de ultravioletas máximos registrados en los días del mes de junio y julio.

Tabla 26*Índice de radiación solar UV*

N.	Fecha	Índice máximo
1	23/06/2021	6
2	24/06/2021	6
3	25/06/2021	5
4	26/06/2021	7
5	27/06/2021	8
9	03/07/2021	4
10	04/07/2021	6
11	05/07/2021	7
12	06/07/2021	5
13	15/07/2021	7
14	16/07/2021	8
15	17/07/2021	5
16	17/07/2021	4

Nota. El índice UV registrados, se encuentra en rangos máximo de 7- 8, en nivel cualitativo alta – muy alta, se recomienda usar camisa, crema de protección solar, sombrero y gafas de sol.

En la Figura 86, se presenta la variación de la radiación UV del día 24 de junio de 2021.

Figura 86*Radiación UV del 24 de junio de 2021*

La papa INIAP-Suprema, requiere de alta luminosidad que depende de la radiación solar, según el monitoreo con la red de sensores los rangos y la exposición del sol no afectan

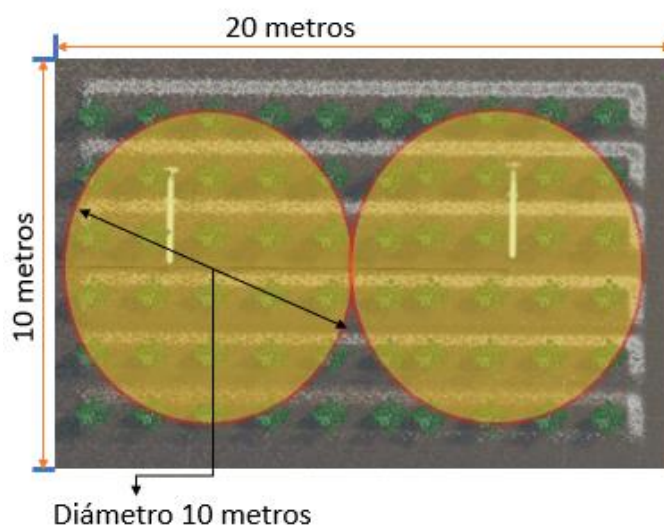
al cultivo, sin embargo, si excede los límites de radiación afectan a la siembra. También los agricultores deben utilizar equipos de protección solar para prevenir afecciones o cáncer a la piel.

4.5. Análisis del Estrés Abiótico en el Cultivo de Papas

En la Figura 87, se visualiza el sistema de riego por aspersión para la protección ante bajas temperaturas en un área de 200 metros cuadrados de cultivo; donde se dispone 2 aspersores con un diámetro de alcance de 10 metros.

Figura 87

Área de cobertura del aspersor sobre el cultivo



4.5.1. Cálculo del Área de Cobertura de los Aspersores

Para identificar las zonas de protección, se procede a calcular el área de cobertura del aspersor en el cultivo.

Datos del cultivo:

Área de terreno 200m² (10 x 20)m

Alcance del aspersor 10 metros

$$\text{Área del aspersor} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (10)^2}{4} = 78,53 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de proteccion} = \text{Área del aspersor} * \text{numero de aspersores}$$

$$\text{Área de protección} = 78,53 * 2 = 157,06 \text{ m}^2$$

$$\text{Área sin protección} = \text{Área de terreno} - \text{Área de protección}$$

$$\text{Área sin protección} = 200 - 157,06 = 42,94 \text{ m}^2$$

Se determinó que el alcance de 2 aspersores dispuestos en el cultivo tiene un área de protección de 157,06 metros cuadrados; mientras que el área sin protección es de 42,94 metros cuadrados.

4.5.2. Densidad de la Siembra

La papa se cultiva en el Ecuador mediante una estrategia orientada a distribuir la semilla en surcos con una separación entre plantas.

La distancia entre surcos depende de la variedad a cultivarse. La variedad en estudio es la papa INIAP-Suprema, para la siembra; la distancia entre surcos es de 0.90 m y entre plantas de 0.30 m.

Según (Pumisacho et al., 2002), para obtener el número de plantas por m² se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de plantas} = \frac{\text{Número total de plantas} * \text{Número de tallos por planta}}{(n * 10 \text{ metros de longitud del surco}) * (\text{distancia entre surcos})} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

n: número de surcos

Datos:

Según (Jerez et al., 2017) el número de tallos por planta de papa es 2 a 3.

Según (Pumisacho et al., 2002), las plantas en 10 metros de longitud de siembra y en 4 surcos es aproximadamente 115 plantas.

n = 4 surcos

$$\text{Densidad de plantas} = \frac{115 \text{ plantas} * 2}{(4 * 10 \text{ m}) * (0.90 \text{ m})} \approx 6 \text{ plantas/metro}^2$$

Se estableció que en 1 metro cuadrado de siembra hay 6 plantas de papa, el cual nos permite calcular el porcentaje de plantas con protección ante bajas temperaturas para prevenir el estrés abiótico.

$$\text{Número de plantas con protección} = \text{Densidad de plantas (plantas/metro}^2\text{)} * \text{Área con protección}$$

$$\text{Número de plantas con protección} = 6 \text{ plantas/metro}^2 * 157.06 \text{ metro}^2 = 942.36 \text{ plantas}$$

$$\text{Número de plantas sin protección} = \text{Densidad de plantas (plantas/metro}^2\text{)} * \text{Área sin protección}$$

$$\text{Número de plantas sin protección} = 6 \text{ plantas/metro}^2 * 42.94 \text{ metro}^2 = 257.64 \text{ plantas}$$

Los resultados obtenidos permiten identificar la reducción del efecto por bajas temperaturas en el cultivo de papas con la finalidad de mitigar el estrés abiótico, se determinó que el número de plantas con protección es de 78.53% equivalente a 942.36 plantas y la zona sin protección es de 21.47% equivalente a 257.64 plantas.

4.6. Comportamiento Fisiológico de la Papa INIAP-Suprema

Para visualizar el comportamiento fisiológico, se creó un escenario de Realidad Virtual. La funcionalidad consiste en combinar factores que afectan a la morfología como el tipo de suelo, tipo de semilla y temperatura ambiente. Los usuarios pueden observar cómo se desarrolla la planta sin necesidad de tenerlos físicamente en un sembrío. En la Tabla 27, se presenta los factores de crecimiento para realizar la simulación.

Tabla 27

Comportamiento virtual sobre la papa INIAP- Suprema

Temperatura ambiente	Tipo de suelo	Tipo de semilla		
Normal 7- 25 °C	Andisoles	Semilla Certificada	Semilla Seleccionada	Semilla Degenerada
		Producción normal de 5-6 kg por planta	Producción normal de 4-5 kg por planta	Producción normal de 3-4 kg por planta
	Molisoles	Producción normal de 4-5 kg por planta	Producción normal de 4 kg por planta	Producción normal de 3-4kg por planta
	Aridisoles	Producción es nula por falta de nutrientes del suelo		
Bajas 1.8 °C	Andisoles	Producción anormal por el efecto de la baja temperatura menor a 1kg.		
	Molisoles	Producción anormal por el efecto de la baja temperatura menor a 1kg.		

Nota. La implementación del escenario de realidad virtual permite el aprendizaje y formación técnica de agricultores de modo que puedan observar el comportamiento de la fisiología de la planta y sus posibles afecciones cuando se somete a bajas temperaturas, tipos de suelo y semilla.

4.7. Análisis Comparativo de la Eficiencia del Proyecto Implementado

Para realizar el análisis comparativo con el proyecto implementado se toma como referencia la estación meteorológica de Rumipamba – Salcedo, el cual se encuentra a una altitud de 2685 metros sobre el nivel del mar.

El criterio comparativo se basa en verificar la temperatura ambiente y la humedad relativa en una hora determinada del día, como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28

Comparación de variables climáticas

Hora	Fecha d/m/a	Estación Meteorológica Rumipamba - Salcedo			Proyecto Implementado		
		T_a °C	RH %	T_d °C	T_a °C	RH %	T_d °C
07h00	17/07/2021	11,8	90	10,21	11	89	9,26
07h00	18/07/2021	10,5	94	9,58	9,68	95	8,92
07h00	19/07/2021	10,9	92	9,65	10,34	90	8,77
07h00	20/07/2021	10,7	98	10,40	9,46	92	8,23
07h00	21/07/2021	9,6	87	7,55	8,58	88	6,71
Promedio variación T_d :				9,48	8,38		

$$Efectividad = 100\% - \left| \frac{T_d Estacion_{Rumipamba} - T_d Proyecto}{T_d Estacion_{Rumipamba}} \right| * 100\%$$

$$Efectividad = 100\% - \left| \frac{9,48 - 8,38}{9,48} \right| * 100\%$$

$$Efectividad = 100\% - 11,60\% = 88,39\%$$

Se determino una presión del 88,39% en las lecturas de las variables climáticas monitoreadas.

4.8. Análisis Económico

Los elementos utilizados en el proyecto se adquirieron en el mercado nacional.

4.8.1. Red de Sensores

La implementación de la red de sensores consta de 2 nodos para la medición de temperatura, humedad, radiación UV y un nodo de control. También, consta de un módulo coordinador central.

En la Tabla 29, se especifican los elementos utilizados con su correspondiente inversión para la ejecución.

Tabla 29

Nómina de elementos de la red de sensores, costos en dólares americanos

No.	Descripción	Cant.	P. Unit.	P. Total
1	Módulo LoRa Heltec	2	40.00	80.00
2	Módulo LoRa TTGO	3	40.00	120.00
3	Módulo ESP-32	1	15.50	15.50
4	Sensor DHT21	1	17.00	17.00
5	Sensor de humedad capacitivo	1	12.50	12.50
6	Sensor de radiación UV	1	10.80	10.80
7	Placas PCB	4	12.00	48.00
8	Batería Lipo 2S 1200 mAh	3	21.50	64.50
9	Módulo regulador de voltaje	4	7.30	29.20
10	Módulo sensor de voltaje	3	4.50	13.50
11	Case PLA con soportes	4	18.50	74.00
12	Pingos para nodos	3	5.00	15.00
13	Varios	1	100.00	100.00
Total				600.00

La inversión total para la implementación de la red de sensores es de 600 USD. Para realizar un balance económico de facilidad se procede a comparar con una estación meteorológica comercial. En la actualidad, existe numerosas empresas y fabricas dedicadas a la construcción de estaciones meteorológicas que van desde los más sencillos hasta sistemas con múltiples sensores y sistemas de predicción. La micro estación meteorológica Bresser, se utiliza para el balance comparativo, como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30*Características de una estación meteorológica*

Característica	Estación Meteorológica Bresser 7002580	Red LoRa
Pantalla a color	Si	Si
Conexión Wifi	Si	Si
Sensor de humedad y temperatura	Si	Si
Aviso de heladas	Si	Si
Visualización de temperatura humedad	Si	Si
Sensor de radiación solar	Si	Si
Visualización de radiación solar	No	Si
Visualización de nivel de batería	No	Si
Envío de alertas	Si	Si
Control de dispositivos activos	No	Si
Compatibilidad para actualización de firmware	Si	Si
Costo	\$3800	\$600

Efectuando la comparación, se obtiene una diferencia de 3200 USD con respecto a la estación meteorológica Bresser. Por lo tanto, al implementar la red de sensores se obtienen un ahorro del 81.25%.

4.8.2. Implementación del Entorno de Realidad Virtual

La inversión para el desarrollo de una aplicación de VR, difiere de acuerdo al país de residencia que varía de 25 a 240 dólares por hora de trabajo.

- El juego más simple de VR: \$5000--\$8000 dólares
- Tiendas en línea de realidad virtual: \$15000--\$25000 dólares
- Juegos de terror: \$20000--\$80000 dólares
- 3Ds Max en VR: \$50000--\$200000 dólares
- MMORPG: Desde \$100000 dólares

Los recursos necesarios para la implantación del entorno de realidad virtual se detallan en la Tabla 31.

Tabla 31

Recursos necesarios para la implantación del entorno de realidad virtual

Detalle	Cantidad	Costo Total
Computador con tarjeta de video Dedicada Nvidia GTX1650	1	\$ 1650.00
Software de diseño para RV Unity 3D	1	Libre para desarrollo personal
Dispositivo de Inmersión para RV Gafas Oculus	1	\$ 400.00
Consumo energético (horas)	100	\$40.00
Horas de diseño para la implementación de RV	100	\$1000.00
	Total	\$3090.00

La inversión para la implementación del entorno de realidad virtual es 3090 USD. Ya que, esta tecnología está en constante avances que conlleva a incrementar el valor para el desarrollo de las aplicaciones.

4.8.3. Sistema de Generación Eléctrica con Panel Solar

El sistema de bombeo por energía solar es diseñado para trabajar en corriente alterna, 120Vac con la utilización de un inversor. Se utiliza una bomba de ½ hp con una instalación del depósito de agua sobre la superficie. El caudal de aspersion dependerá de la distancia de la bomba hacia el sembrío y de la capacidad del sistema solar fotovoltaico autónomo que le provea de energía mediante un banco de baterías. Los costos que incurren en la implementación de sistema fotovoltaico se detallan en la Tabla 32.

Tabla 32

Recursos para sistema de energía solar

Detalle	Cantidad	Costo Total
Panel solar 24 Voltios 60 celdas	1	\$ 200.00
Regulador de carga panel solar	1	\$ 70.00
Banco de baterías de plomo acido 24 Vdc	1	\$ 200.00
Inversor de corriente alterna	1	\$150.00
Bomba de agua ½ hp	1	\$50.00
Manguera de ¾ pulgada (metros)	30	\$15.00

Detalle	Cantidad	Costo Total
Aspersores	2	\$15.00
Estructura de soporte del panel	1	\$30.00
Conectores de bronce	2	\$10.00
Conductor #10 (metros)	10	\$10.00
Varios	1	\$50.00
Total		\$800.00

La rentabilidad del sistema de bombeo de agua por energía solar es muy evidente y esto se debe a que utiliza una fuente de energía inagotable. Las placas solares trabajan durante un tiempo de 20 a 25 años sin apenas pérdidas de rendimiento.

En la actualidad, los agricultores para el riego utilizan Motobombas de combustión interna que se encuentran en el mercado nacional en aproximadamente 450 dólares, que consumen 1 galón de combustible por cada dos hora de funcionamiento. El costo de combustible a nivel internacional sin subsidio es de 3.51 USD/GALON. En la Tabla 33, se presenta una comparación entre el sistema renovable implementado y la motobomba.

Tabla 33

Comparación entre el sistema de riego implementado y una Motobomba

Detalle	Bomba de ½ HP	Motobomba a combustión
Costo del sistema de riego	\$ 800.00	\$ 450.00
Precio por USD/kWh	\$ 0.109	--
Precio del galón de combustible USD/galón	--	\$ 3.51
Consumo de energía	370 watts	--
Consumo de combustible	--	½ Galón/ hora
Horas de funcionamiento diario	3	3
Consumo diario	3.33 kWh	1.5 galones
Costo de consumo diario	0.36 USD	5.26 USD
Costo de consumo mensual	10.80 USD	157.8 USD
Diferencia del costo de operación		157.80-10.89=147 USD

Efectuando la comparación y verificado los costos. El precio del sistema de riego con energía solar es de 800 dólares, mientras que el costo de una motobomba es de 450 dólares; la inversión con respecto al costo inicial supera en un 43% al valor de la motobomba. Pero, realizado un balance con el costo de operación del sistema renovable con respecto a la motobomba se obtiene un ahorro de 147 USD al mes equivalente al 93.15%.

4.9. Discusión de Resultados

La presente investigación indica los impactos negativos que ocasionan los cambios climáticos por las bajas temperaturas en los cultivos mostrando indicadores cualitativos y cuantitativos.

La precisión de la red de sensores es del 88.39 % en la medición de las variables climáticas, que permiten calcular la temperatura del punto de rocío y comparar con la temperatura del aire y saber si produce una helada blanca o negra para que el sistema de aspersión se ponga en marcha para mitigar el fenómeno.

El estrés por bajas temperaturas se desarrolla cuando el aire tiene poco vapor de agua ósea la humedad relativa es baja y la temperatura del punto de rocío es inferior a 0° C; de modo que el aire es tan seco que la temperatura no iguala a la de rocío y por tanto no se produce condensación ni formación de escarcha. Sin embargo, los cultivos que son dañados presentan una coloración negruzca, por la congelación de la savia de las plantas o del agua de sus tejidos.

Se determinó que en la zona de estudio existe una radiación ultravioleta en un rango de 7 a 8 índice máximo, lo cual permite que la fisiología de la planta de papas se desarrolle con normalidad.

El entorno de Realidad Virtual permite visualizar el desarrollo fisiológico de la planta de papas INIAP Suprema e interactuar con el interfaz permitiendo cambiar el tipo suelo, semilla y la temperatura del ambiente.

El costo de implementación de la red de sensores es evaluado con respecto a una estación meteorológica de tipo comercial y se obtuvo un ahorro en el costo de 81.25 %.

La implementación de la interfaz virtual tiene un costo de 3090 USD debido a que se requiere una tarjeta de video dedicada y una versión de procesador actualizado.

La implementación del sistema de generación de energía eléctrica por energía solar para el accionamiento de la bomba de riego presenta un costo de 800 USD de inversión inicial lo cual supera en un 43% el costo al implementar una motobomba, sin embargo, el costo de operación del sistema implementado tiene un ahorro del 93.15 %.

Capítulo V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La implementación del sistema de agricultura inteligente, permitió minimizar el estrés abiótico por bajas temperaturas en los cultivos de papas en un 78%, la experimentación se efectuó en un cultivo de papas con un área de sembrío de 200 metros cuadrados.
- El sistema implementado presenta una precisión del 88% en las lecturas de las variables climáticas monitoreadas tal como: temperatura ambiente y humedad relativa, en comparación a la estación meteorológica próxima a la zona de análisis ubicada en Rumipamba-Salcedo.
- La implementación de la red de sensores permite que alrededor de 80 familias de la comunidad de Chirinche Bajo, se beneficien con el monitoreo de las variables climáticas: temperatura y humedad; que son factores que generan directamente el estrés abiótico por bajas temperaturas en los cultivos de papas.
- La plataforma IoT monitorea en tiempo real los datos del clima, a través del Gateway por medio de la red de sensores, se controla: la activación de alertas tempranas, el modo de operación (Automático-Manual) y la activación del sistema de riego.
- Con las variables recibidas de la red de sensores, el servidor IoT permite informar al agricultor mediante alertas tempranas, cuando se presenta un descenso de temperatura y pueda tomar acciones preventivas en el cultivo.
- El entorno de Realidad Virtual, permite simular e interactuar por medio de la inmersión, el comportamiento fisiológico de la planta de papa INIAP Suprema, con la capacidad de modificar factores como: el tipo de suelo, semilla y temperatura; provocando que cambie su estructura morfológica.

- Mediante la observación del cultivo de papas se recreó un entorno de Realidad Virtual, el cual permite indicar el comportamiento fenológico del sembrío, visualizar las variables climáticas, controlar de forma manual el sistema de riego y el comportamiento de los aspersores.
- El sistema de riego tiene una autonomía de 3 horas mediante el uso de energía fotovoltaica, con un ahorro en el costo de operación del 93 % con respecto a la energía tradicional.

5.2. Recomendaciones

- Para aumentar el tiempo de autonomía de las baterías de los nodos sensores, se debería realizar un análisis de factibilidad, para implementar generadores de energía fotovoltaica de modo que recarguen las baterías para aumentar el tiempo de operación.
- Al encontrarse los nodos sensores en los cultivos, su instalación debe ser protegida, para evitar que ingrese polvo o líquido, ya que puede provocar que la transmisión de datos falle o disminuya el tiempo de durabilidad.
- Utilizar un computador con capacidad de desarrollar aplicaciones de Realidad Virtual que operen con una tarjeta gráfica, equivalente o superior a una NVIDIA GTX 970 o una AMD R9 290.

Bibliografía

- Abella, M. A. (2005). *Sistemas fotovoltaicos*. SAPT Publicaciones Técnicas, SL.
https://www.academia.edu/download/38373658/SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS.pdf
- Aguilar Zavaleta, S. (2020). *Diseño de una solución basada en el internet de las cosas (IoT) empleando LoRaWAN para el monitoreo de cultivos agrícolas en Perú*. [Tesis de ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2205>
- Agricultura Moderna. (2018). *La realidad aumentada llega al agro*. Recuperado el 11 de julio de 2021. <https://www.agmoderna.com.ar/agricultura-moderna/la-realidad-aumentada-llega-al-agro/>
- AgroSpray. (2021). *Realidad Virtual: la gran innovación que le hacía falta al Agro*. Recuperado el 5 de mayo de 2021. <https://agrospray.com.ar/blog/realidad-virtual/>
- AlejandroVR. (2020). *Tutorial de Instalación de Virtual Desktop*. Recuperado el 7 de mayo de 2021. <https://alehandorovr.com/tutorial-de-instalacion-de-virtual-desktop>
- App&Web. (2019). *Aplicaciones de IoT en el sector de la agricultura*. Recuperado el 5 de marzo de 2021. <https://www.appandweb.es/blog/iot-agricultura/>
- Bahamonde Chicaiza, D. J. (2020). *Diseño de la red internet de las cosas (IOT) en la empresa Roger Sport*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana].
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18932>
- Borrero, J. D., Fernández, G., & Rodríguez, C. (2018). *Aplicación de la tecnología LoRaWAN en la agricultura*. *Bo True Activities*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24492.77443>
- Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K., & Ellis, K. (2017). *IoT in agriculture: Designing a Europe-wide large-scale pilot*. *IEEE communications magazine*, 55(9), 26-33. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600528>
- Briceño, J. (2005). *Transmisión de dato (Tercera ed.)*. Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería.

- Caicedo Sandoval, C. E. (2017). Estudio sobre los efectos locales del cambio climático y fenómenos meteorológicos en la provincia de Cotopaxi. Latacunga. [Tesis de Ingeniería, Universidad Técnica de Cotopaxi: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; Carrera de Ingeniería en Medio Ambiente, 2017].
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4288>
- Calvo, A. (2019). Agricultura inteligente: ejemplos reales - Agroptima. Recuperado el 15 de mayo de 2021. <https://www.agroptima.com/es/blog/agricultura-inteligente-ejemplos/>
- Camponectado. (2019). La radiación solar en los cultivos de campo abierto. Recuperado el 8 de junio de 2021. <http://www.camponectado.com/index.php/2019/06/10/la-radiacion-solar-en-los-cultivos-de-campo-abierto/>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2001). Heladas (1 ed.). México. D.F. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/122-FASCCULOHELADAS.PDF>
- Cerem Comunicación. (2017). La agricultura inteligente es la controvertida estrategia de la FAO. Recuperado el 13 de junio de 2021. <https://www.cerem.ec/blog/por-que-la-agricultura-climaticamente-inteligente-es-tan-controvertida>
- Chang, D. C., Sohn, H. B., Cho, J. H., Im, J. S., Jin, Y. I., Do, G. R., Kim, S.J., Cho, H.M., and Lee, Y. B. (2014). Freezing and Frost Damage of Potato Plants: a Case Study on Growth Recovery, Yield Response, and Quality Changes. *Potato Research*, 57(2), 99-110.
<https://doi.org/10.1007/s11540-014-9253-5>
- Chiriboga Torres, Á. T. (2020). Diseño e Implementación de una Solución con Tecnología LoRa para el Monitoreo de Ubicación Vehicular con una Aplicación Web. [Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/21864>

- Contreras Méndez, Á. (2015). Análisis comparativo entre distintos métodos para evaluar daños por heladas en papas. Recuperado el 22 de mayo de 2021.
<https://andrescontrerasmendez.wordpress.com/2015/11/27/23/>
- CONGOPE. (2021). Sistema de alerta temprana frente a heladas a través del uso de sensores climáticos. Latacunga: ESPE.
- Cordero Delgado, A. B. (2013). Caracterización, identificación y evaluación del fenómeno meteorológico la helada durante los años 2005 al 2011, en las zonas comprendidas por las tres estaciones meteorológicas de: Quimsacocha, La Esmeralda y San Gerardo. Cuenca. [Tesis de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7934>
- Cortez, M., & Hurtado, G. (2002). Guía Técnica Cultivo de la papa. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal CENTA.
- Cuesta, X., Rivadeneira, J., Pumisacho, M., Montesdeoca, F., Velsquez, J., Reinoso, I., & Monteros, C. (2014). Manual del cultivo de papa para pequeños productores. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP/Programa Nacional de Raíces y Tubérculos-papa. (2 ed.). Quito, Ecuador.
- de la Torre León, T., de la Torre León, M. A., & Esper, R. C. (2016). Tecnología de la información aplicada a la medicina espacial. *Medicina espacial*, 39-53.
- Devaux, A., Ordinola, M. E., Hibon, A., & Flores, F. A. (2010). El sector papa en la región andina: Diagnóstico y elementos para una visión estratégica (Bolivia, Ecuador y Perú). Centro Internacional de la Papa. Lima, Peru.
- Egli, P. (2015). Overview of emerging technologies for low power wide area networks in Internet and M2M scenarios. Link Labs, 28.
- El Blog del Grupo Fertiberia. (2017). La agricultura de precisión, un paso más cerca del futuro. Recuperado el 9 de abril de 2021.

<https://www.fertiberia.com/es/blog/2017/diciembre/agricultura-inteligente-2-agricultura-de-precision/>

El Universo. (2019). Smart Farming, la forma inteligente de mejorar los cultivos y de cuidar el suelo. Recuperado el 24 de marzo de 2021.

<https://www.eluniverso.com/larevista/2019/08/21/nota/7482033/smart-farming-forma-inteligente-mejorar-cultivos-cuidar-suelo/>

Espinosa Córdova, E. (2017). Evaluación del Daño por Frío en Veintiún Genotipos de Papa (*Solanum tuberosum*) mediante las Metodologías de Nivel de Daño por Escala Visual y Fuga de Electrolitos. [Tesis de ingeniería, Universidad San Francisco de Quito].

Estacio Rodriguez, C. A., & Ariza Garzón, A. M. (2020). Sistema de protección ante las heladas, para los cultivos de papa del territorio cundiboyacense. AMKHA. Bogotá. [Tesis de Ingeniería, Pontificia Universidad JAVERIANA Bogotá].

Fonseca, C. (2010). Criterios para la ubicación y selección óptima de estaciones hidrometeorológicas y ambientales de la red nacional de información ambiental.

García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. Revista Ciencia y Tecnología. Universidad de Palermo.

García, J. (2020). Oculus Quest 2, análisis: una de las mejores (y asequibles) opciones para iniciarse en la realidad virtual. Recuperado el 2 de julio de 2021.

<https://www.xataka.com/analisis/oculus-quest-2-analisis-caracteristicas-precio-especificaciones>

Gómez, J., Navarrete, I., Taipe, A., Andrade-Piedra, J. L., & Kromann, P. (2017). Degeneración de semilla de papa: factores importantes a considerar.

Heltec Automation. (2021). Wifi LoRa (V2) - Heltec Automation. Recuperado el 3 de junio de 2021. <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>

Hernández, D. M., Peralta, G., Manero, L., Gomez, R., Bilbao, J., & Zubia, C. (2017). Energy and coverage study of LPWAN schemes for Industry 4.0. 2017 IEEE International

Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM) (págs. 1-6). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ECMSM.2017.7945893>

Herrera, F., & Ojeda, R. (2019). Diseño de un prototipo para el monitoreo de radiación UV ambiental en el municipio de Popayán. Popayán.[Tesis de Ingeniería, Fundación Universitaria de Popayán].

IAT. (2020). IoT en agricultura. Hacia los cultivos inteligentes. Recuperado el 17 de junio de 2021. <https://iat.es/tecnologias/internet-de-las-cosas-iot/agricultura/>

INAMHI. (2019). Nivel Amenaza Meteorológica: Alto. Fenómenos: Bajas Temperaturas. Quito: INAMHI.

INTAGRI S.C. (2021). Requerimientos de clima y suelo para el cultivo de la papa. Recuperado el 5 de mayo de 2021.

<https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-la-papa>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). Anuario meteorológico Nº 53-2013.

In Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Issue 52).

http://www.serviciometeorologico.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf

Irama, P. R. J., & Arturoa, M. B. (2017). Productividad de paneles solares monocristalinos. In Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM A (Vol. 5, p. 79).

Kodali, R. K., Yerroju, S., & Sahu, S. (2018). Smart Farm Monitoring Using LoRa Enabled IoT. 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICGCIoT.2018.8753086>

Kratsch, H., & Wise, R. (2000). The ultrastructure of chilling stress. *Plant Cell and Environment*, 23, 337-350.

- La Torre, B. (2012). Asistencia Técnica dirigida en fertilización en el cultivo de papa. Agrobanco, 28. Obtenido de <http://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/032-h-papa.pdf>
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (1998). Biotic influences. In *Plant physiological ecology*. Springer, 378-494.
- Lewis, N. (2009). Sustainability and Energy. *Science*, 798-801.
- Li, H. (2007). Analysis of virtual reality technology applications in agriculture. In *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*. 1, págs. 133-139. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77251-6_15
- Li, S., Cui, J., & Li, Z. (marzo de 2011). Wireless sensor network for precise agriculture monitoring. 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 1, págs. 307-310. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2011.87>
- Lichtenthaler, H. (1996). Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants. *Journal of Plant Physiology*, 148(1-2), 4-14. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80287-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80287-2)
- Lora Alliance. (Noviembre de 2015). A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. White paper, 20. https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf
- Ma, Y. W., & Chen, J. L. (abril de 2018). Toward intelligent agriculture service platform with lora-based wireless sensor network. 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI). (págs. 204-207). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394568>
- Martinez, L., Ibacache, A., & Rojas, L. (2008). Las heladas en la agricultura [en línea]. Chillan: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 184. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7258> (Consultado: 3 julio 2021).

- Mastrocola, N., Pino, G., Mera, X., Rojano, P., Haro, F., Rivadeneira Ruales, J. E., & Cuesta Subía, H. X. (2016). Catálogo de variedades de papa del Ecuador.
<http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2748>
- Mat, I., Kassim, M. R., Harun, A. N., & Yusoff, I. M. (2018). Smart Agriculture Using Internet of Things. 2018 IEEE Conference on Open Systems (ICOS). (págs. 54-59). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICOS.2018.8632817>
- Math, R. K., & Dharwadkar, N. V. (agosto de 2018). IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Precision Agriculture in India. 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC) I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), 2018 2nd International Conference on. (págs. 81-86). IEEE. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2018.8653749>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP). (2019). Agricultura, la base de la economía y la alimentación. <https://www.agricultura.gob.ec/agricultura-la-base-de-la-economia-y-laalimentacion/>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). (2016). La política agropecuaria ecuatoriana: Hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015-2025. I -II Parte. Quito, Ecuador.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP). (2014). Manual de Riego Parcelario. Quito.
- Miñarro, M. (2016). Desarrollo de una aplicación de Realidad Virtual. Valencia: [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].
- Montesdeoca, F., Andrade, H., Cuesta Subía, H. X., & Carrera, E. (2000). Información técnica de la variedad de papa INIAP-Suprema.
<http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/86>
- Montesdeoca, F., Panchi, N., Navarrete, I., & Pallo, E. . (2013). Guia Fotográfica de las Principales Plagas del Cultivo de papas en Ecuador. Quito: CIP.

- Moreno, P., & Herrera, M. (2017). Caracterización de las heladas en el Cantón Salcedo, Cotopaxi. *UTCiencia" Ciencia y Tecnología al servicio del pueblo"*, 1(2), 99-106.
- Naylamp Mechatronics SAC. (2021). Sensor de temperatura y humedad relativa DHT21 (AM2301). Recuperado el 27 de junio de 2021. <https://naylampmechatronics.com/>
- Nilsen, E., & Orcutt, D. (1996). *Physiology of plants under stress. Abiotic factors*. John Wiley & Sons, INC. New York.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Perdidas de cultivos debido a estrés y la modificación genética como respuesta*. <http://www.fao.org/home/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Agricultura sostenible: una herramienta para fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe*. América Latina y el Caribe: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2010). *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía (Vol. 1)*. Roma: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (12-13 de Octubre de 2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Cómo alimentar al mundo en 2050*, 4.
- Ossa, S. I. (2017). *Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos*. *Revista Vector*, 12, 51-60. <https://doi.org/10.17151/vect.2017.12.6>
- Ouazzani, I. (2012). *Manual de creación de videojuego con Unity 3D (Master's thesis)*.
- Palacios Frisancho, G. (2017). *Diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de cultivos nativos utilizando Internet del Todo y redes FOG*. [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional del Altiplano]. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5945>

- Panettieri, J. (1997). Crisis económica, perturbaciones en el mundo del trabajo y movimientos de población, 1937-1943. Revista: Cuadernos del CISH, 2(2-3), 47-78.
Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/13617>
- Patil, K. A., & Kale, N. R. (2016). A model for smart agriculture using IoT. 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). (págs. 543-545). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICGTSPICC.2016.7955360>
- Penagos, A., & Ospina, C. (2019). La agenda 2030 y la transformación de los territorios rurales: un desafío para institucionalidad latinoamericana. 2030 - Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina y el Caribe.FAO,(31), 21.
- Pérez, L. R. (2010). Ecofisiología del cultivo de papa (*solanum tuberosum*). Revista Colombiana de Ciencias Horticolas, Pontifica Universidad Javeriana.
- Pino, M. (2009). Principales tipos de estrés abiótico que afectan al cultivo de papa comercial, y su importancia para la Región de Magallanes. Fisiología & Biotecnología Vegetal. Chile: Chile: INIA.
- Pino, M., & Chen, T. (2016). Efecto de las Heladas en el cultivo de papa, y desafíos del mejoramiento genético. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).
- Pinzás, A. R. C. (2009). Software libre aplicado al dibujo industrial: el caso Blender. Industrial data, 12(1), 62-67.
- Planas, O. (2019). Colector solar de tubos de vacío. Recuperado el 27 de junio de 2021.
<https://solar-energia.net/energia-solar-termica/colector-solar-termico/colectores-tubos-vacio>
- Popović, T., Latinović, N., Pešić, A., Zečević, Ž., Krstajić, B., & Djukanović, S. (2017). Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. Computers and electronics in agriculture., 140, 255-265.

- Prado Alvarez, D. (2021). Creación de Interfaces de Realidad Virtual Móvil en Unity 3D y Validación Experimental de sus Requisitos de Red.
- Pumisacho, M., & Sherwood, S. (2002). El cultivo de la papa en Ecuador. Quito: Editorial Abya Yala.
- Rachmani, A. F., & Zulkifli, F. Y. (2018). Design of iot monitoring system based on lora technology for starfruit plantation. In TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference (págs. 1241-1245). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650052>
- Reyes Díez, A. (2017). Integración de dispositivos IoT en una red comunitaria. País Vasco. [Tesis de Ingeniería, Universidad del País Vasco]. <http://hdl.handle.net/10810/23790>
- Rivera Erazo, M. A. (2012). Inventariación y Documentación de Información sobre prácticas Agroecológicas en el cultivo de la Papa (*Solanum tuberosum*) en Chimborazo. [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2205>
- Sahitya, G., Balaji, N., Naidu, C. D., & Abinaya, S. (2017). Designing a wireless sensor network for precision agriculture using ZigBee. 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC) (págs. 287-291). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IACC.2017.0069>
- Semtech Corporation. (2021). LoRa Modulation Basics. Recuperado el 20 de junio de 2021.
<https://info.semtech.com/find-documentation>
- SIGTIERRAS, Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (2017). Memoria explicativa del Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Solórzano, Silvia & Andrade, Eduardo J. (2019). Aplicación para Oculus Go basada en fósil de megafauna prehistórica como soporte a la divulgación del patrimonio paleontológico ecuatoriano. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12549>

- Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2015). LoRawan specification. LoRa alliance. <https://osch.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/blogContentFileSnapshot/1556464676588.pdf>
- Tambussi, E. A. (2005). Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estrés abiótico: algunos casos de estudio. Barcelona: Universitat de Barcelona.
<http://hdl.handle.net/2445/36093>
- Thinger.io. (2021). Thinger.io-Documentation. Recuperado el 21 de junio de 2021.
<https://docs.thinger.io/>
- Triana Useche, J. C., & Rodriguez Leguizamo, R. E. (2018). Prototipo de solución lot con tecnología lora en monitoreo de cultivos agrícolas. Bogotá.[Tesis de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/13388>
- Ugsha Guanotasig, D. M., & Ugsha Guanotasig, L. J. (2013). Diseño e implementación de un sistema HMI utilizando dispositivos de diferentes tecnologías y comunicaciones inalámbricas para la supervisión y control en tiempo real de la Central Hidroeléctrica Catazación del cantón Pangua perteneciente a la ELEPCO S.A. [Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" Extensión Latacunga].
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7332>
- Vega, S., & Bamberg, J. (1995). Screening the U.S. potato collection for frost hardiness. *American Potato Journal*, 72(1), 13-21. <https://doi.org/10.1007/BF02874375>
- Vitale, L. (1983). *Hacia una Historia del Ambiente en América Latina. De las culturas aborígenes a la crisis ecológica actual.* Nueva Sociedad. Editorial Nueva Imagen.
<https://repositorios.cihac.fcs.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/123456789/243/1/anuario-28-01.pdf>
- Vu, V. A., Trinh, D. C., TRUVANT, T. C., & Bui, T. D. (2018). Design of automatic irrigation system for greenhouse based on LoRa technology. 2018 International Conference on

Advanced Technologies for Communications (ATC) (págs. 72-77). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ATC.2018.8587487>

Wikipedia. (04 de 06 de 2021). Energía solar fotovoltaica. Recuperado el 25 de junio de

2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica

YARA. (2021). Principios agronómicos en el cultivo de la papa. Recuperado el 7 de julio de

2021. <https://www.yara.com.ec/nutricion-vegetal/papa/principios-agronomicos-en-el-cultivo-de-la-papa/>

Yu, F., Zhang, J. F., Zhao, Y., Zhao, J. C., Tan, C., & Luan, R. P. (2009). The research and

application of virtual reality (VR) technology in agriculture science. In International

Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. (págs. 546-

550). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79

Zhang, X., Zhang, M., Meng, F., Qiao, Y., Xu, S., & Hour, S. (2018). A Low-Power Wide-Area

Network Information Monitoring System by Combining NB-IoT and LoRa. IEEE

Internet of Things Journal, 6(1), 590 - 598.

<https://doi.org/10.1109/IJOT.2018.2847702>

Zhao, J. C. (Julio de 2010). The study and application of the IOT technology in agriculture. In

2010 3rd International Conference on Computer Science and Information

Technology. 2, págs. 462-465. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2010.5565120>

Zhao, W., Lin, S., Han, J., Xu, R., & Hou, L. (2017). Design and implementation of smart

irrigation system based on LoRa. In 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps).

(págs. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269115>

Anexos