



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Gestión Industrial

**SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL
MONITOREO REMOTO DE pH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA
DE CULTIVO HIDROPÓNICO, COMO PARTE DE BPAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

Ing. José Alejandro Pablo

Asesorado por el Mtro. Ing. Jaime Eduardo Mercar

Guatemala, octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL
MONITOREO REMOTO DE pH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA
DE CULTIVO HIDROPÓNICO, COMO PARTE DE BPAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JOSÉ ALEJANDRO PABLO

ASESORADO POR EL MTRO. ING. JAIME EDUARDO MERCAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN GESTIÓN INDUSTRIAL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Walter Darío Caal Mérida
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL
MONITOREO REMOTO DE pH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA
DE CULTIVO HIDROPÓNICO, COMO PARTE DE BPAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha febrero de 2020.


Ing. José Alejandro Pablo

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.685.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE pH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO, COMO PARTE DE BPAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**, presentado por: **José Alejandro Pablo**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión industrial después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, octubre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, octubre de 2022

LNG.EEP.OI.685.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE pH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO, COMO PARTE DE BPAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS”

presentado por **José Alejandro Pablo** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión industrial** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala 25 de mayo 2022.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** titulado: **“SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE PH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO, PARA MEJORA DE CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS”** de José Alejandro Pablo, del programa de **Maestría en Gestión Industrial**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

MA. Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel
Coordinador
Maestría en Gestión Industrial
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala 6 de mayo 2022

Maestro Edgar Álvarez Coti
Director Escuela de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería

Estimado Maestro Álvarez Coti:

Por este medio me es grato saludarlo y desearle todo tipo de éxitos en sus labores diarias. El motivo de la presente es para informarle que he leído, revisado y aprobado el informe final de graduación titulado:

**SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL
MONITOREO REMOTO DE PH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA
DE CULTIVO HIDROPÓNICO, PARA MEJORA DE CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS
CULTIVOS**

Del estudiante **Jose Alejandro Pablo**, quien se identifica con número de carnet: **201114030** y número de DPI: **1903265730101**.

El trabajo cuenta con todos los aspectos requeridos para constituir un informe final de trabajo de graduación para la Maestría en Gestión Industrial.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Jaime Eduardo Mercar
Mtro. en Administración Industrial y de Empresas de Servicios

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi guía y darme acompañamiento en cada momento de la vida. Todo lo puedo en Ti que me fortaleces.

Mi madre

Por tu apoyo, esfuerzo y ejemplo de trabajo y superación.

AGRADECIMIENTOS A:

Facultad de Ingeniería	Por permitirme consolidar mi vida profesional.
Familia Velásquez	Por ser una importante influencia en mi formación de ética y valores que me acompañan en cada etapa de mi vida.
Mtro. Ing. Jaime Mercar	Por su asesoría y apoyo profesional en la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
OBJETIVOS	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXIX

1.	MARCO REFERENCIAL	1
2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.	Agricultura urbana e hidroponía	7
2.1.1.	Categorías de agricultura urbana	8
2.1.2.	Agricultura familiar	9
2.1.3.	Conceptos de hidroponía.....	9
2.1.3.1.	Cultivo en agua.....	11
2.1.3.2.	Tipos de sistemas en solución o hidropónicos	11
2.1.3.3.	Elementos que componen un sistema de cultivo sin suelo	15
2.1.3.3.1.	Solución nutritiva	15
2.1.4.	Localización del huerto hidropónico urbano	20
2.1.5.	Ventajas y desventajas de los cultivos hidropónicos	21

2.2.	IoT en la agricultura, la agricultura inteligente	23
2.2.1.	Internet de las cosas IoT	26
2.2.1.1.	Modelos de comunicación del IoT	29
2.2.2.	Redes de área amplia de baja potencia – LPWAN.....	34
2.2.2.1.	Plataformas y tecnologías basadas en LPWAN.....	35
2.2.2.1.1.	SigFox	36
2.2.2.1.2.	Symphony Link.....	38
2.2.2.1.3.	Weightless.....	38
2.2.2.1.4.	Nwave	40
2.2.2.1.5.	NB-IoT	40
2.2.2.1.6.	LoRa®.....	41
2.2.3.	Especificación LoraWAN	42
2.2.3.1.	Banda ISM.....	44
2.2.3.2.	Configuración de red	45
2.2.4.	Protocolos y plataformas IoT	47
2.2.4.1.	MQTT	49
2.2.4.2.	Mosquitto.....	52
2.2.4.3.	Node-RED	53
2.2.4.4.	Tecnologías móviles.....	54
2.2.4.5.	Base de datos en tiempo real (RTDBS).....	55
2.2.4.5.1.	<i>Firebase</i>	58
2.2.5.	Sensores de potencial de hidrógeno (pH)	60
2.2.5.1.	Tipos de sensores	60
2.2.5.1.1.	Sensor de vidrio	60
2.2.5.1.2.	Sensor combinado	63

	2.2.5.1.3.	Sensor de pH diferencial	65
	2.2.5.1.4.	Sensores de pH inteligentes	67
	2.2.6.	Monitoreo de pH dentro de un sistema de cultivo hidropónico	68
2.3.		Calidad en la producción de hortalizas	70
	2.3.1.	Administración de la calidad en producción de alimentos	70
	2.3.2.	Gestión de aseguramiento de la calidad	72
	2.3.2.1.	Buenas prácticas agrícolas	76
	2.3.2.2.	Aplicación de BPA en la cadena de producción	77
	2.3.2.3.	Ventajas de implementar BPA	79
	2.3.2.4.	Consideraciones para la implementación de la BPA	80
	2.3.3.	Certificaciones en el comercio de hortalizas	82
	2.3.4.	Indicadores de gestión	83
	2.3.4.1.	Fichas de autoevaluación	83
3.		PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	85
	3.1.	Análisis del sistema hidropónico NFT	85
	3.1.1.	Diagnóstico del cultivo	87
	3.1.2.	Diagnóstico de la medición de pH en agua de solución	90
	3.2.	Análisis y diseño del sistema de monitoreo remoto	92
	3.3.	Riesgos de contaminación que puedan afectar la calidad e inocuidad en los cultivos hidropónicos	100

3.4.	Análisis del rendimiento y calidad en los cultivos cosechados	102
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	115
4.1.	Implementación del sistema hidropónico NFT	115
4.2.	Diseño e implementación del sistema de monitoreo remoto mediante el uso de tecnologías del IoT	116
4.3.	Identificar los principales riesgos de contaminación que puedan afectar la calidad e inocuidad en los cultivos hidropónicos.....	117
4.4.	Analizar los indicadores de calidad para establecer el rendimiento productivo de los cultivos.....	118
4.5.	Determinar los beneficios del IoT en hidroponía	118
CONCLUSIONES.....		121
RECOMENDACIONES		123
REFERENCIAS		125
APÉNDICES.....		137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación de los cultivos sin suelo.....	10
2.	Efecto de la variación de nutrientes en los cultivos	19
3.	Tecnologías utilizadas en un ecosistema de agricultura inteligente	24
4.	Internet de las cosas nació entre los años 2008 y 2009.....	27
5.	Modelo de comunicación <i>Device-to-Device</i>	30
6.	Modelo de comunicación <i>Device-to-Cloud</i>	31
7.	Modelo de comunicación <i>Device-to-Gateway</i>	32
8.	Modelo de comunicación <i>Back-End Data Sharing</i>	33
9.	Ancho de banda vs. rango de cobertura de redes inalámbricas	35
10.	Ancho de banda vs. rango de corta distancia, celular y LPWA	36
11.	Arquitectura de red Sigfox.....	37
12.	Protocolo LoRaWAN (Semtech).....	43
13.	Topología de red para implementación de IoT con Sigfox, LoRaWAN o NB-IoT.....	46
14.	Modelo publicación - suscripción utilizado por MQTT	51
15.	Flujo en Node-RED	53
16.	Generaciones de los sistemas de comunicación móviles	55
17.	Tiempo de vida de las transacciones representado como funciones de valor	57
18.	Sensores de vidrio con diferentes tipos de diafragma.....	61
19.	Sensores ISFET con diferentes tipos de diafragma	62
20.	Partes de una sonda de pH (Sensorex)	64
21.	Sensores combinados con diferentes tipos de diafragma.....	65

22.	Esquema de un sensor de pH diferencial (Sensorex).....	66
23.	Esquema de control y monitoreo de un sistema hidropónico. (Sensorex)	69
24.	Conceptos para el aseguramiento de la calidad e inocuidad de un alimento	73
25.	Interacción entre BPA, BPM y HACCP	74
26.	BPA como parte de un sistema de aseguramiento de la calidad	75
27.	Principios básicos de BPA	76
28.	Cadena de producción de lechuga hidropónica.....	78
29.	Implementación del sistema hidropónico NFT	86
30.	Plántulas de lechuga cressa listas para el trasplante al sistema hidropónico NFT	88
31.	Cultivo en fase de desarrollo	89
32.	Tira reactiva de pH.....	91
33.	Diagrama del sistema de monitoreo remoto de pH.....	93
34.	Configuración de dispositivo MQTT en Thingspeak.....	93
35.	Configuración del dataloger con las credenciales MQTT de Thingspeak	94
36.	Gráfica de lecturas de pH en Thinkspeak	95
37.	Lecturas de pH registradas de forma manual con medidor digital durante el desarrollo de los cultivos en el período I	96
38.	Lecturas de pH registradas de forma manual con medidor digital durante el desarrollo de los cultivos en el período II	97
39.	Lecturas de pH registradas de forma remota durante el desarrollo de los cultivos en los períodos III y IV	98
40.	Tasa de permanencia de los niveles de pH en un rango de 5.8 y 6.5.....	99
41.	Comparación del porcentaje promedio de cultivos con color aceptable	102

42.	Gráfica de las medias de los dos tipos de medición	104
43.	Comparación del porcentaje de cultivos con peso mayor o igual a 124 gramos	106
44.	Comparación de los pesos máximos, mínimos y promedio de las cosechas	107
45.	Comparación del porcentaje de cultivos con manchas o quemaduras	108
46.	Comparación del porcentaje de cultivos con espigado	110
47.	Comparación del porcentaje de cultivos aptos para ser comercializados	112

TABLAS

I.	Operacionalización de variables	XXV
II.	Características de los sistemas hidropónicos	12
III.	Capacidad de intercambio catiónico para diferentes sustratos.	13
IV.	Influencia en la porosidad y retención de agua según el tamaño de las partículas	14
V.	Compatibilidad de frecuencias LoRaWAN según la región	45
VI.	Comparación de las plataformas web para IoT	48
VII.	Costos de la implementación del sistema hidropónico.....	87
VIII.	Períodos de cosecha y su método de medición	96
IX.	Resumen de lecturas de pH medidas de forma manual.....	97
X.	Resumen de lecturas de pH medidas de forma remota	98
XI.	Riesgos de contaminación en el proceso productivo de lechuga hidropónica.....	100
XII.	ANOVA para la variable color aceptable de las cosechas	103
XIII.	Análisis descriptivo de la variable color de los cultivos cosechados ..	103

XIV.	Prueba de homogeneidad de varianzas para la variable color aceptable en los cultivos cosechados.....	105
XV.	ANOVA para la variable peso de lechuga en gramos.....	107
XVI.	ANOVA para la variable presencia de manchas en las cosechas	109
XVII.	ANOVA para la variable presencia de espigado en las cosechas	111
XVIII.	ANOVA para la variable rendimiento comercial de las cosechas	113

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
%	Porcentaje
Q	Quetzal (moneda guatemalteca)

GLOSARIO

Aprovechamiento	Medida del grado de utilización de las materias primas y los materiales.
ASCII	Código estándar estadounidense para el Intercambio de Información.
BPA	Buenas Prácticas Agrícolas.
Calidad	Es la totalidad de los rasgos y características de un producto o servicio que se sustenta en su habilidad para satisfacer las necesidades y expectativas del cliente, y cumplir con las especificaciones para las que fue diseñado.
Control	Proceso que verifica el rendimiento mediante su comparación con los estándares establecidos.
Cosecha	Es el fin de la etapa del cultivo y el inicio de la preparación o acondicionamiento para el mercado.
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Gestión	Conjunto de procedimientos y acciones que se llevan a cabo para lograr un determinado objetivo.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
HTTP	Protocolo de transferencia de hipertexto.
IA	Inteligencia artificial; es la habilidad de una máquina de presentar las mismas capacidades que los seres humanos.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
INCAP	Instituto de Nutrición para Centroamérica y Panamá.
IoT	Internet de las cosas, agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red.
IP	Protocolo de Internet.
ML	Aprendizaje automático; es una disciplina del campo de la inteligencia artificial que, a través de algoritmos, dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones.
Monitoreo	Proceso permanente que consiste en revisar el cumplimiento de las actividades programadas y revisar si se están alcanzando las metas y acuerdos propuestos.

MQ	Cola de mensajes.
MQTT	Protocolo de red ligero, de publicación y suscripción, de máquina a máquina.
NTP	Rosca estadounidense cónica para tubos.
PAFFEC	Programa de agricultura familiar para el fortalecimiento de la economía campesina.
Proceso	Conjunto de actividades planificadas que implican la participación de un número de recursos coordinados para conseguir un objetivo identificado.
QoS	Calidad del servicio; mide la consistencia en el cumplimiento de ciertas normas de servicios IP de paquetes y datos.
Rango	Intervalo comprendido entre el valor mínimo y máximo que el instrumento puede medir, transmitir o indicar.
Rendimiento de cosecha	Producción por unidad de superficie.
Rentabilidad	Relación obtenida entre las unidades y el valor total de los activos empleados para generarla.
Riesgo	Es la probabilidad que ocurra algún peligro. Puede ser físico, biológico y químico.

Seguridad alimentaria	Es la situación en la que todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y desarrollar una vida saludable.
Sensor	Es un dispositivo que a partir de la energía del medio en el que se mide, proporciona a su salida una señal.
Señal	Es aquella muestra física que puede ser medida, ya sea variable o constante en el tiempo.
Transmisor	En el campo de la instrumentación y control, es un equipo que emite una señal, código o mensaje a través de un medio que está conectado al sensor mediante conductores eléctricos.
Urbano	Los rasgos que con más frecuencia se han considerado para caracterizar el hecho urbano han sido, fundamentalmente, el tamaño y la densidad, el aspecto del núcleo, la actividad no agrícola y el modo de vida, así como ciertas características sociales, tales como la heterogeneidad, la cultura urbana y el grado de interacción social.

RESUMEN

La presente investigación busca mejorar la calidad y rendimiento en la producción de cultivos en un huerto hidropónico urbano ubicado en la ciudad de Guatemala, con capacidad de 200 cultivos, mediante los principios de la agricultura urbana inteligente y la aplicación de las buenas prácticas agrícolas, para ayudar en la seguridad alimentaria y economía doméstica de las familias.

El principal objetivo es desarrollar un sistema tecnológico que permita monitorear la variable de pH en el agua de solución de nutrientes en la etapa de desarrollo de los cultivos y que junto con las recomendaciones de las buenas prácticas agrícolas se minimice el riesgo de contaminación.

La medición de los niveles de pH se realizó desde el trasplante hasta la cosecha con una tasa de permanencia del 67 % dentro de los niveles de 5.5 a 6.5. Con los datos de los niveles de pH el productor dispone de trazabilidad en los procesos y le permite tomar decisiones para garantizar niveles correctos de pH en la solución, que benefician al correcto desarrollo de los cultivos.

Se implementó un sistema de monitoreo remoto utilizando las tecnologías del internet de las cosas para el monitoreo, envío, visualización y almacenamiento de los niveles de pH en agua de solución nutritiva, en un sistema hidropónico de técnica de película nutritiva NFT. Durante las etapas del proceso productivo se identificaron los riesgos de contaminación y se propuso el uso de buenas prácticas agrícolas como parte de un sistema de aseguramiento de la calidad que permite garantizar salud e inocuidad en los cultivos cosechados.

Finalmente, se determinó la correlación entre la medición constante de los niveles de pH y el impacto en las cosechas, la cual se vio reflejada de forma significativa en el tono de color verde aceptable, con un incremento del 4 % respecto de los valores previos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Se detectó que la calidad en cosechas de cultivos hidropónicos urbanos es deficiente debido a la falta de monitoreo constante de pH en agua de solución de nutrientes.

- Descripción del problema

La falta de un sistema de monitoreo remoto de las variables de calidad de agua de solución en cultivos hidropónicos como pH, conductividad, oxigenación y temperatura mediante el uso de tecnología provoca riesgos de contaminación durante el proceso de producción, afecta el rendimiento en la producción y calidad de los cultivos, así como la salud de los microproductores y consumidores finales.

Conocer el estado de la solución en tiempo real es vital durante la etapa de crecimiento de los cultivos hidropónicos, ya que estos absorben nutrientes y agua en distintas proporciones durante su desarrollo; por lo tanto, disponer de esta información le permite al productor una mejor toma de decisiones en cuanto al momento adecuado para realizar los ajustes, tanto del volumen de agua como de la composición química de la solución y, de igual forma planificar la limpieza y mantenimiento de los elementos que conforman el sistema hidropónico, con el fin de garantizar cultivos sanos y seguros.

La toma de datos del estado de la solución de forma local y manual requiere la asignación de una gran cantidad de recursos. En huertos urbanos el proceso se vuelve ineficiente, ya que se necesita de equipo de medición especializado, recurso humano capacitado en medición dispuesto a permanecer de forma presencial en el invernadero durante la toma de datos y un plan de monitoreo. Si este no se cumple, aumenta el riesgo de contaminación de la solución y los cultivos, sin contar con la posibilidad de que se puedan cometer errores al momento de transcribir los resultados o se olvide la programación de toma de las distintas lecturas en el momento establecido.

Al no tener una base de datos con los registros históricos del estado de la solución durante la producción del lote, se puede afectar de forma directa la inocuidad, calidad y trazabilidad de los productos, cuando estos se dispongan a la venta final. Estos son elementos importantes dentro de las buenas prácticas agrícolas, cuya implementación puede ser un elemento diferenciador que le permita al productor desarrollarse de forma competitiva en el mercado.

- Formulación del problema

El estudio planteado se orientó hacia la búsqueda de respuestas a las preguntas siguientes:

- Pregunta general

¿De qué forma las tecnologías del IoT aplicadas al monitoreo remoto de pH en agua de solución de nutrientes de un sistema de cultivo hidropónico urbano permiten el aumento en la productividad de las cosechas al reducir las fuentes de contaminación como parte de la aplicación de BPA?

- Preguntas auxiliares de investigación
 - ¿Cómo se encuentra el sistema de medición de variables de solución de nutrientes en huertos hidropónicos urbanos?
 - ¿Qué indicadores se pueden utilizar para medir la calidad de la producción de los cultivos hidropónicos urbanos?
 - ¿Cuáles son los principales beneficios de la implementación de las tecnologías del IoT en la hidroponía y de qué forma estas agregan valor a las cosechas?
- Delimitación del problema

La propuesta del sistema de visualización remota de datos de pH, como parte de la calidad del agua de solución en sistema de cultivo hidropónico se desarrolló para un invernadero urbano de producción utilizando este sistema de cultivo, en el área de ciudad de Guatemala. Durante el transcurso de la investigación contó con las condiciones de higiene, así como los recursos físicos y tecnológicos para su implementación.

La investigación se llevó a cabo en el período comprendido entre enero a octubre de 2020. Para su desarrollo se contó con un espacio físico de 25 m² dentro de una residencia en la ciudad de Guatemala, la cual cumplió con las consideraciones necesarias que las buenas prácticas agrícolas recomiendan respecto de la elección de un lugar adecuado para el establecimiento de cultivos hidropónicos urbanos; de manera adicional, se contó con acceso a servicios de energía, agua potable y cobertura de señal de las distintas compañías

proveedoras de telecomunicaciones de Guatemala para la transmisión remota de los datos de las variables que debían monitorearse con la red celular.

Los costos generados en el desarrollo de la propuesta fueron cubiertos por el investigador. Esto incluyó material del sistema hidropónico y sistema de monitoreo remoto.

OBJETIVOS

General

Implementar un sistema tecnológico mediante el uso de tecnologías del IoT que permita visualizar de forma remota el estado del nivel de pH en agua de solución en sistemas de cultivos hidropónicos urbanos, para ayudar a minimizar las fuentes de contaminación como parte de las BPA y así garantizar rendimiento, calidad e inocuidad en las cosechas.

Específicos

- Identificar la situación del sistema de medición de variables de solución de nutrientes en huertos hidropónicos urbanos.
- Analizar los indicadores de calidad para establecer el rendimiento productivo de la cosecha de cultivos hidropónicos.
- Determinar los beneficios de la implementación de las tecnologías del IoT en la hidroponía y de qué forma estas agregan valor a las cosechas.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

- Alcance

Para lograr los objetivos planteados, la investigación se abordó con un alcance descriptivo, ya que se recolectó información del proceso productivo de la lechuga hidropónica para identificar los riesgos de contaminación que puedan ser minimizarlos mediante las BPA y el uso de tecnologías del IoT.

- Diseño

El diseño fue de tipo no experimental, porque únicamente se describe y analiza la variable independiente, el monitoreo de las variables del agua de solución y los indicadores que determinan la calidad y rendimiento en la producción de los cultivos cosechados. Para la identificación de los riesgos de contaminación en el proceso productivo el diseño se basó en la observación tal y como se da en su contexto natural para después analizar cada etapa.

- Tipo de estudio

El enfoque de la investigación fue mixto, ya que se utilizaron las fortalezas de la investigación cuantitativa y descriptiva para recolección, análisis y vinculación de datos, tanto cuantitativos como cualitativos, para tratar de responder el planteamiento del problema. Las fuentes de información utilizadas fueron la primaria y secundaria.

- Variables

Las variables involucradas en la investigación son:

- Variables independientes
 - Método de medición del nivel de pH
- Variables dependientes
 - Rendimiento
 - Calidad

Tabla I. Operacionalización de variables

Objetivo	Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Escalas de medición	Tipo de variable	Valores esperados
Sistema tecnológico remoto	Prevalencia del nivel de pH adecuado en la solución	Coficiente de pH entre 0 y 14	Tasa de permanencia de la solución dentro de los niveles de 5.5 y 6.5	Valores de pH en el rango de 5.5. - 6.5 / total de datos tomados * 100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	95 % - 100 %
Medición de variables de calidad de las cosechas hidropónicas	Calidad de los cultivos cosechados	Color verde aceptable	Porcentaje de cultivos con color verde aceptable	No de cultivos cosechados con color verde aceptable / Total de cultivos cosechados * 100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	>70 %
		Peso g	Porcentaje de cultivos con peso > = 124 gramos	No de cultivos de cultivos con peso >= 124 gramos / Total de cultivos cosechados * 100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	>50 %
		Presencia de Tip burn (manchas, quemaduras)	Porcentaje de cultivos con presencia de Tip burn	No de cultivos con presencia de Tip burn / Total de cultivos cosechados * 100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	<10 %
		Presencia de espigado	Porcentaje de cultivos con presencia de espigado	No de cultivos con presencia de espigado / Total de cultivos cosechados * 100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	<3 %

Continuación de la tabla I.

Rendimiento de los cultivos cosechados	Rendimiento comercial	Tasa de cultivos con peso mayor a 115 g, color verde brillante, sin manchas ni hojas espigadas	No de cultivos con peso mayor a 115 g, color verde brillante, sin manchas ni hojas espigadas / Total de cultivos cosechados * 100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	➤ 69 %
--	-----------------------	--	---	-----------------------	-----------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

- Unidades de análisis

La población bajo análisis fue la totalidad de la cosecha de un huerto hidropónico urbano integrado por 200 cultivos.

El método utilizado para la recolección de la información fue por medio de la recopilación documental; como también la observación directa estructurada de todas las etapas del proceso productivo. El instrumento utilizado para recolectar y registrar esta información fue por medio de bases de datos digitales, listas de trazabilidad y de chequeo estandarizado que permitieron la medición de las variables de manera uniforme.

- Técnicas de análisis de información

Se procedió a recolectar datos semanales de forma manual del nivel de pH del agua de solución del sistema de cultivo hidropónico durante dos períodos de

cosechas. Luego se obtuvieron datos cada hora de forma remota de los valores de pH del agua de solución del sistema hidropónico durante los dos siguientes períodos de cosecha.

Posteriormente, se analizaron los resultados obtenidos de cada período de cosecha de las variables de peso, color aceptable, presencia de manchas y de espigado, y rendimiento comercial durante los 4 períodos de cosecha con la técnica estadística de análisis de varianza ANOVA de un factor; con base en su resultado se realizó posteriormente la prueba de homogeneidad de varianzas de la variable bajo análisis.

Se realizó la interpretación de los datos para analizar el efecto que tiene la variable de pH en el agua de solución en un sistema de cultivo hidropónico urbano, en el rendimiento y calidad de los cultivos cosechados. Se contó con el apoyo de las herramientas informáticas IBM SPSS Statistics y Excel, para el análisis, generación de gráficas y posterior presentación de resultados.

- Fases del estudio

El proceso para alcanzar el objetivo de este diseño de investigación fue el siguiente:

- Fase 1: revisión documental de las características de los sistemas de medición de variables de solución de nutrientes en huertos hidropónicos urbanos.
- Fase 2: desarrollo e implementación de un sistema hidropónico urbano, en donde las primeras dos cosechas se realizaron con un

monitoreo de pH de forma manual y las siguientes dos cosechas bajo monitoreo remoto, utilizando un sistema de IoT.

- Fase 3: elaboración del instrumento o instrumentos para medir las variables dependientes y recolección de datos durante la etapa de desarrollo hasta la cosecha de los cultivos de los cuatro períodos de cosechas.
- Fase 4: identificación de los riesgos de contaminación que puedan afectar la calidad e inocuidad de los cultivos en cada etapa del proceso productivo.
- Fase 5: presentación de resultados de los datos cuantitativos de calidad obtenidos por la implementación de un sistema de monitoreo remoto del nivel de pH del agua en solución de nutrientes en un huerto hidropónico urbano.
- Fase 6: presentación de las recomendaciones basadas en las buenas prácticas agrícolas que ayuden a minimizar el impacto de los riegos de contaminación en los cultivos.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación es una sistematización debido a que en el sistema hidropónico no se contaba con un sistema de medición y monitoreo remoto de pH, lo cual afectaba la calidad y rendimiento de los cultivos cosechados.

La problemática de la tendencia del crecimiento en los próximos años de la población mundial, la cual es principalmente urbana, así como el uso inadecuado, ineficiente e insostenible del agua y de grandes extensiones de suelo utilizadas para la producción de cultivos, hace necesario impulsar el desarrollo de nuevas técnicas de producción de cultivos sin suelo en espacios urbanos que permitan satisfacer la alta demanda de alimentos.

La importancia de la solución propuesta reside en garantizar calidad, inocuidad y rendimiento en los cultivos hidropónicos cultivados en espacios urbanos, por medio del monitoreo constante de las distintas variables que influyen en la calidad de las cosechas. Se aplica en conjunto con lineamientos que las buenas prácticas agrícolas recomiendan para la precosecha, desarrollo y cosecha de los cultivos hidropónicos.

Entre los resultados y beneficios de esta investigación se encuentra el incremento en la calidad y rendimiento de las cosechas al minimizar las fuentes de contaminación que pueden provocar enfermedades o pérdida total de las cosechas.

El diseño y metodología que se plantó para lograr los objetivos de la investigación fue de tipo experimental, que involucró a dos grupos de cosechas de lechuga hidropónica de 200 plantaciones cada uno. En el primero se utilizó un método de medición de pH del agua de solución de forma manual con papel de prueba. En el otro grupo la medición de la variable se realizó mediante un sistema de medición de forma remota. Los datos de la medición se almacenaron en una base de datos para su trazabilidad y se correlacionaron los niveles de pH durante el desarrollo y rendimiento de los cultivos cosechados.

En el capítulo II, que corresponde al marco teórico, se detallan los elementos que componen un sistema hidropónico, así como las tecnologías de IoT aplicadas al diseño de un sistema de monitoreo remoto para captura de niveles de pH en agua de solución de nutrientes en cultivos hidropónicos. Se explica además cómo su utilización conjunta busca aprovechar de mejor manera el uso del agua y los espacios dentro de las ciudades, para que las familias urbanas produzcan cultivos de calidad, frescos, sanos e inocuos. También se da a conocer que estas formas de cultivo pueden ser utilizadas para consumo propio o para el desarrollo de microempresas familiares rentables dedicadas a la producción de cultivos hidropónicos.

En el capítulo III se presentan los resultados obtenidos al aplicar un sistema de monitoreo remoto de pH utilizando tecnologías del IoT al huerto hidropónico urbano.

En el capítulo V se discuten los resultados obtenidos al momento de la cosecha de los cultivos.

1. MARCO REFERENCIAL

Los aportes en el desarrollo de las distintas técnicas de producción de cultivos sin suelo han ido de la mano con el uso de tecnologías para automatizar procesos que permiten un mayor aprovechamiento de los recursos utilizados en la producción de cultivos. Las herramientas tecnológicas han sido aplicadas para el monitoreo y automatización de la dosificación de nutrientes dentro de sistemas hidropónicos NFT, así como un conjunto de sensores para el monitoreo de las condiciones físicas dentro del invernadero.

En Guatemala se han desarrollado varios proyectos que buscan implementar y mejorar las técnicas utilizadas en hidroponía en varias regiones del país.

A pesar de esto existen grandes desafíos, incluso a nivel industrial, tal como lo expresan Alex Tenenbaum y Diego Arenales colaboradores de la empresa Veggiewell en la entrevista realizada por Rivera (2021): en Guatemala existe poco conocimiento sobre la agricultura hidropónica; ese es uno de los grandes desafíos.

Esta brecha del conocimiento invita a realizar investigaciones que permitan implementar y documentar el uso de nuevos materiales en sistemas hidropónicos para lograr mejores rendimientos (Girón Bonilla, 2018).

En este contexto, el acceso a la información en internet y el uso de las tecnologías de comunicación juegan un papel importante, ya que permiten

informar y capacitar a cualquier persona que quiera implementar un proyecto hidropónico casero. Tal como lo expresan los expertos entrevistados.

En una investigación que realiza Garzaro (2016) sobre cultivos hidropónicos en Guatemala y en cuyo trabajo realiza una entrevista a Alfredo Toriello de la empresa Legucorp, se corrobora que, aunque el sistema tiene potencial para la escala comercial, los altos costos de instalación y los complejos requerimientos técnicos de manejo de los sistemas de cultivo son una barrera de entrada.

Un ejemplo de la evaluación financiera para la implementación de un proyecto hidropónico lo realiza Rosales Caniz (2010) en su investigación sobre la viabilidad y factibilidad de un proyecto hidropónico casero evaluado a 5 años de vida en la región del occidente del país. El proyecto de huertos hidropónicos se cuantificó con una inversión de: Q300,267.75 para su funcionamiento, mostrando una utilidad favorable a los beneficiarios, tasa interna de retorno de 80 % con una tasa de descuento del 12 % y un valor actual de Q.99,904.18.

A pesar de que existen diversas barreras para la implementación de un sistema hidropónico, se han observado beneficios positivos a un mediano plazo en distintas regiones del país y del mundo. Algunos de estos beneficios en proyectos de agricultura y que además involucran tecnologías de IoT, se han visto reflejados en la mejora de la productividad, calidad y rendimientos de los cultivos, tal como lo indica Ramos García (2021) de la empresa Advantech, que se dedica al desarrollo de dispositivos y soluciones en el campo del IoT.

Otro ejemplo que demuestra cómo el uso de tecnologías del IoT permite el desarrollo de proyectos hidropónicos en casi cualquier ambiente, es el proyecto de hidroponía vertical automático desarrollado por Chowdhury *et al.* (2020) en la región del golfo, donde es mayormente desértico y de clima seco. En este

proyecto se utilizó una plataforma abierta de Internet de las cosas (IoT) para almacenar y mostrar los parámetros del sistema y la interfaz gráfica para el acceso remoto.

Chowdhury *et al.* (2020) resaltan que el sistema también proporciona una amplia gama de información que podría ser esencial para los investigadores de cultivos, la cual orienta a una mayor comprensión respecto de cómo los parámetros clave del sistema hidropónico se correlacionan con el crecimiento de las plantas. También indica que la plataforma propuesta se puede utilizar tanto para optimizar cuantitativamente la configuración de la agricultura interior como para automatizar algunas de las actividades de mantenimiento más intensivas en mano de obra.

García (2021) expone el caso de éxito de aplicar tecnologías de IoT a la agricultura inteligente con el proyecto de monitorización ambiental mediante cobertura de largo alcance LoRaWAN. En este se reemplazaron equipos basados en tecnología 3G que recopilaban datos de campos de arroz y que luego se enviaban a la nube para ser analizados. El alto coste de este esquema provocó un replanteamiento del proyecto y la búsqueda de una solución más rentable.

La nueva arquitectura utilizada por García (2021) se basó en tecnología inalámbrica LoRaWAN, implementando nodos para la captura de datos con dispositivos IoT LoRa WISE-1510 y el Gateway IoT LoRa WISE-3610 junto con la tecnología IoT WISE-PaaS/DeviceOn y iEdge de Advantech.

Como indica García (2021) los beneficios del cambio de tecnología 3G aplicando la red móvil a una tecnología inalámbrica LoRaWAN fueron: alimentación de los nodos a través de baterías con duración de varios años, reduciendo consumo y mantenimiento, cobertura de larga distancia para

gestionar cientos de nodos de sensores y mejora de la productividad de los campos de arroz por la posibilidad de incrementar los datos recopilados.

Las distintas condiciones durante la pandemia mundial del COVID-19 como el aislamiento, cuarentenas, inocuidad, restricciones de horario y demás medidas implementadas por los gobiernos, obliga a replantear la forma en que se producen y distribuyen los cultivos a la población.

FAO y Claure (s.f) exponen la importancia de los huertos y productores urbanos en Bolivia, quienes, debido a restricciones provocadas por la pandemia, debieron encontrar nuevas formas de trabajar y llevar su producción a las ciudades cercanas; en esta crisis, las familias que se dedicaban a la agricultura urbana y periurbana fueron fundamentales para garantizar el flujo de alimentos hacia las zonas más pobladas de Bolivia.

En el estudio realizado en Guatemala por Tello Cano (2010) se demuestra la importancia de la implementación de huertos hidropónicos familiares para la mejora de la seguridad alimentaria y financiera de las familias, ya que, según el informe, “n promedio general el 70 % de la cosecha fue destinada al autoconsumo, y el 30 % restante a la venta por concepto de excedentes de producción.

De igual forma Roveló (2020) resalta la importancia de los huertos urbanos y la agricultura urbana en la cadena de suministro de los cultivos y expone que las interrupciones en el comercio y distribución de alimentos durante la crisis, han resaltado el valor de las cadenas de suministro cortas y locales, al requerir de menor tiempo de transporte y costo de almacenamiento y refrigeración.

Bajo estas condiciones, los huertos urbanos y la implementación de nuevas tecnologías en la agricultura son alternativas apropiadas que permiten a los productores minimizar las consecuencias socioeconómicas provocadas por la pandemia y mitigar la vulnerabilidad alimentaria en las ciudades.

Delgado Hernández (2020) resalta cómo la tecnología en el sector agrícola puede contribuir a mejorar la producción y las cadenas agroalimentarias en América Latina, ya que la situación actual se presenta como una oportunidad de crecimiento para la región, de manera que podrá innovarse en procesos productivos agrícolas e implementar tecnologías de punta en el sector.

Entre las diferentes tecnologías disponibles en el sector agrícola, Delgado Hernández (2020) expone que algunas soluciones tecnológicas en la agricultura van de la mano con aplicaciones de IoT, como es el caso del proyecto Neltume Plagas en Chile, el cual emplea un sensor adherido a trampas. Esto les permite monitorear la plaga *Lobesia botrana*, por ejemplo, pero a su vez medir la temperatura y humedad en el mismo sitio.

Delgado Hernández (2020) también indica que una de las mejores aplicaciones del IoT en campo es el uso de drones, ya que permiten el monitoreo y recolección de datos mediante la toma de fotografías y sensores que facilitan determinar el estado de los campos de cultivos: Esta tecnología se combina en muchos casos con métodos de inteligencia artificial. Todo esto permite optimizar la producción agrícola, a la vez que se logra mayor sostenibilidad ambiental. En Uruguay existen empresas que destacan en este rubro, tales como Agrodron y Skydrone del grupo Skyagri de Brasil.

Otra forma en que los invernaderos inteligentes aprovechan el IoT, de acuerdo con Meola (2021), es utilizando dispositivos conectados que permiten

crear un microclima autorregulado propicio para la producción de cultivos. Estos entornos controlados eliminan las luchas de las inclemencias del tiempo y los depredadores, ya que a la vez brindan información en tiempo real a los agricultores para una eficiencia óptima.

El desarrollo tecnológico y la innovación también se observa en empresas reconocidas en el campo de la agricultura como resalta Meola (2021) con el caso de la empresa John Deere (uno de los nombres más importantes en equipos agrícolas), empresa que ha comenzado a conectar sus tractores a Internet y ha creado un método para mostrar datos sobre el rendimiento de los cultivos de los agricultores; de forma similar a los autos inteligentes, la compañía es pionera en tractores autónomos, situación que liberaría a los agricultores para que puedan realizar otras tareas que aumenten aún más la eficiencia.

En los ejemplos citados se resaltan factores en común que ayudan a mejorar la economía del productor ante situaciones donde la logística puede verse afectada; adicional, se observa una mejora en el rendimiento en cultivos, control de las variables en los invernaderos, monitoreo remoto y la mejor gestión del control de plagas y enfermedades.

Cabe resaltar también que la implementación de un huerto hidropónico urbano necesita de formación por parte de los productores, así como asesoramiento y acompañamiento en las primeras etapas de los proyectos para la elección de la especie que se va a cultivar, según las condiciones climáticas de región.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agricultura urbana e hidroponía

De acuerdo con Moreno (2007) la agricultura urbana (AU) involucra el cultivo, procesamiento, distribución y consumo de productos agrícolas dentro del área de una ciudad, con la principal característica que utiliza para su producción recursos físicos poco aprovechados. Dentro de las ciudades, estos recursos pueden incluir espacios como terrazas, patios, jardines, balcones y predios; así como agua de lluvia, materiales reciclables y mano de obra desempleada.

Debido a sus características prácticas, Moreno (2007) señala que la agricultura urbana “ayuda a mejorar la calidad nutricional de la dieta alimentaria y reduce los gastos de la canasta familiar en comunidades urbanas y periurbanas que se encuentren en condiciones de pobreza” (p.10).

Por lo tanto, en el contexto de seguridad alimentaria y economía doméstica, Moreno (2007) subraya que: “un número creciente de gobiernos locales ha reconocido el potencial que tiene la agricultura urbana y periurbana como parte de una estrategia que busque de reducir la pobreza y mejorar la seguridad alimentaria, salud y economía doméstica de grupos vulnerables” (p. 15).

Moreno (2007) agrega que la agricultura urbana puede ser una fuente de generación de ingresos tanto para productores hombres como para mujeres, debido a los servicios, productos e insumos que giran en torno a su implementación; además, constituye “una fuente de empleo para el personal

contratado para la operación de microempresas relacionadas con la actividad” (p.16).

Por otro lado, Fernández *et al.* (2007) reconocen que el proceso de adaptación a las necesidades de la sociedad urbana es trascendental para entender la AU, sus potencialidades y tipos, y que “la agricultura urbana debe ser considerada como resultado de la interacción permanente entre lo urbano y el ámbito rural, y no como un sobrante rural” (p.18).

2.1.1. Categorías de agricultura urbana

Fernández *et al.* (2007) clasifican la agricultura urbana en tres categorías:

- Huerto urbano: está ligado a las actividades de cultivos de hortalizas con enfoque social. Entre ellos se encuentran los tipos de huertos:
 - Familiares
 - Parcelados
 - Escolares o educacionales
 - Terapéuticos
 - Comunitarios
 - De movimientos colectivos de ocupación
- Agricultura urbana: granjas que ofrecen productos o servicios agrícolas con base en un modelo de negocio y que aprovechan la cercanía a las ciudades.
- Agricultura urbana no orientada: son modelos agrícolas tradicionales desarrollados en los perímetros de la ciudad, cuyos modelos de negocio no aprovechan la ventaja competitiva de su ubicación.

2.1.2. Agricultura familiar

La agricultura familiar se define como “la interacción de una familia con la naturaleza, en la que se desarrollan procesos productivos agrícolas sustentables con base en sus saberes ancestrales, recursos locales e innovaciones tecnológicas para el sustento de la vida” (PAFFEC, 2017, p. 8).

Según PAFEC (2017), “la agricultura familiar provee en América Latina y el Caribe, entre 27 y 67 % de la producción alimentaria de cada país y ocupa entre el 12 y el 67 % de la superficie agropecuaria” (p.12).

PAFFEC (2017) también expone que, “cuando la agricultura familiar orienta sus actividades a los mercados e incorpora valor a los productos antes de su comercialización, se convierte en una fuente de generación de empleo directo e indirecto” (p.12).

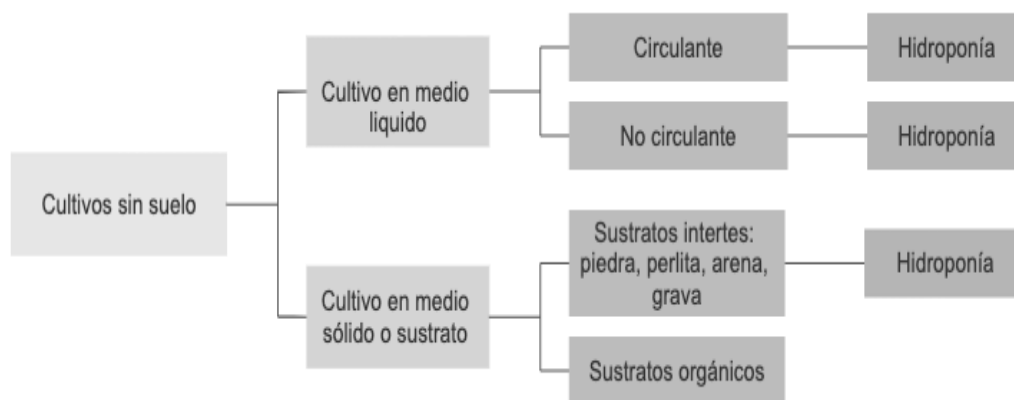
2.1.3. Conceptos de hidroponía

En el *Manual de cultivos hidropónicos populares* desarrollado con el apoyo de INCAP y OPS, Castañeda (1997) indica que “la palabra hidroponía significa plantar verduras y vegetales en agua o materiales distintos a la tierra y que también se le conoce como la agricultura del futuro” (p.15).

También se entiende por cultivo sin tierra al método que provee los alimentos a las plantas para su perfecto desarrollo, no por intermedio de su vía natural, la tierra, sino a través de una solución sintética de agua y sales minerales diversas.

Los términos cultivos sin suelo e hidroponía usualmente se utilizan sin distinción. Para una mejor comprensión sobre las diferencias, se realizó una adaptación del trabajo realizado por Winsor y Schwarz (1990) respecto del cultivo sin suelo para la producción de cultivos hortícolas; esta información se presenta en el siguiente esquema:

Figura 1. **Clasificación de los cultivos sin suelo**



Fuente: elaboración propia, realizado con draw.io.

Como se observa en la figura anterior, la clasificación de los cultivos sin suelo depende del medio donde se desarrollen las raíces, tal como lo indican Andreau *et al.* (2015) las plantas cosechadas sin suelo se pueden dividir en dos categorías principales: “las cultivadas en agua (hidroponía), que utilizan balsas o técnicas como film nutritivo (NFT) y el cultivo en sustrato, que utiliza por ejemplo fibra de coco, turba, vermiculita, perlita, lana de roca o arena” (p. 17).

A pesar de que las técnicas utilizadas en hidroponía tienen varias décadas de existir, los conceptos y fundamentos establecidos son aplicados aún hoy en día cuando se implementa este tipo de cultivos.

2.1.3.1. Cultivo en agua

Como se mencionó anteriormente, en este tipo de sistema de cultivo no se utiliza ningún medio sólido de anclaje que sirva para instalar y sujetar la planta y su respectiva raíz; por lo tanto, su desarrollo es completamente en la solución nutritiva (Urrestarazu, 2004).

2.1.3.2. Tipos de sistemas en solución o hidropónicos

Las categorías en que pueden clasificarse los sistemas hidropónicos simplificados, tal como lo declaran Orsini *et al.* (2012) dependen del destino del agua después del riego: “los sistemas de circuito cerrado son aquellos que reciclan el agua drenada volviéndola a utilizar para un riego adicional; y los ciclos de circuito abierto son aquellos donde el exceso de agua se drena y es desechada” (p. 25).

- Sistema de solución estática: como afirma Andreau *et al.* (2015), en este tipo de cultivos las raíces están sumergidas en recipientes profundos con solución nutritiva. Debido a que la solución se encuentra sin movimiento, la solución nutritiva puede padecer deficiencia de oxígeno, por lo que no se recomienda para altas temperaturas.
- Sistema con solución recirculante (técnica de solución nutritiva recirculante en canales NFT): en este tipo de sistema la solución se encuentra en constante movimiento de forma intermitente dentro de la infraestructura de canales, por ende, el aporte de oxígeno no es crítico para su implementación.

- Cultivos en aire o aeropónicos: en este sistema de cultivo se utiliza una solución del tipo circulante, pero con la característica que las raíces se encuentran en contacto directo con el aire. Tal como lo expone Andreau *et al.* (2015), para mantener húmeda la raíz de estos sistemas “se utilizan recintos y microaspersores ubicados estratégicamente que se encargan de suministrar descargas de solución nutritiva de corta duración y frecuencia variable, mientras que la solución sobrante es recolectada y llevada nuevamente al depósito de reserva” (p. 82).

Los principales parámetros de un sistema de cultivo en medio líquido, de acuerdo con lo propuesto por Andreau *et al.* (2015), se presentan en la siguiente tabla:

Tabla II. **Características de los sistemas hidropónicos**

Parámetros	Valores
Densidad de cultivo	8 a 24 plantas/m ²
Pendiente de canales	1.5 %
Caudal de solución	2 a 6 l/min
Conductividad eléctrica	Invierno: 0.4 a 0.6 meq/100 g Verano: 1 a 1.6 meq/100 g
pH	5.5 a 6.1

Fuente: elaboración propia.

Es evidente la importancia del monitoreo y control de las distintas variables dentro de los sistemas de cultivos en agua, ya que la variación fuera de los límites recomendados tiene consecuencias en la calidad de los cultivos. Tal como menciona Andreau *et al.* (2015) “altas temperaturas pueden provocar floración y afectar la calidad comercial de las cosechas, debido a que el aumento de la temperatura en la solución provoca la disminución en el aporte de oxígeno a las raíces” (p.74).

- Cultivos en sustratos

Andreau *et al.* (2015) recomiendan utilizar un tipo de sustrato según la condición o combinación de factores del cultivo, como higiene, manejo del riego, condiciones climáticas y el tipo de cultivo. Se pueden diferenciar dos grupos de sustratos según su capacidad de intercambio catiónico: los sustratos con alto CIC son más estables ante las variaciones del pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva. Entre ellos se encuentran la turba, fibra de coco y vermiculita. Luego, los sustratos con bajo CIC son muy perceptibles a los cambios de pH y CE; por ejemplo, la perlita, arena y lana de roca.

Tabla III. **Capacidad de intercambio catiónico para diferentes sustratos**

Material	<i>Meq. L⁻¹(CIC)</i>
Tierra arcillo limosa	200-300
Turba negra	200-400
Turba rubia	100-200
Corteza de pino	80-120
Perlita	5-10
Arena	0

Fuente: elaboración propia.

Otra clasificación de los sustratos se realiza según su capacidad de adsorción y fijación de los nutrientes. Andreau *et al.* (2015) hacen la diferencia: “Los sustratos químicamente inertes los cuales no intervienen y los químicamente activos, los cuales además de ser útiles para la fijación para las raíces, funcionan como depósito de agua y nutrientes que se proporcionan durante la fertilización” (p. 3).

Otra clasificación de los sustratos se realiza según el origen de los materiales, ya que estos pueden ser orgánicos o inorgánicos, artificiales o minerales. De forma práctica, también se pueden realizar mezclas de sustratos; para esto se deben considerar ciertas características físicas y químicas como la porosidad, capilaridad, estabilidad física, peso, disponibilidad y costo. Estas características influyen en la capacidad de retener agua y humedad, así como de aireación, compactación, salinidad, pH constante y velocidad de descomposición. Según Andreau *et al.* (2015) “la porosidad debería ser de aproximadamente el 25 %” (p. 7).

Entre las características químicas para combinar o elegir el mejor sustrato para cualquier cultivo se encuentra la capacidad de intercambio catiónico variable, que es “la capacidad que tiene un suelo o sustrato para retener y liberar iones positivos, lo cual afecta directamente a la cantidad y frecuencia de aplicación de fertilizantes” (Andreau *et al.*, 2015, p. 45). A continuación, se muestra cómo la porosidad de diferentes elementos tiene una influencia directa con su capacidad de retención de líquido:

Tabla IV. **Influencia en la porosidad y retención de agua según el tamaño de las partículas**

Tamaño de partículas (mm)	Porosidad total (%)	Agua retenida (%)
0-1	66.4	52.2
1-2.5	78.3	28.5
2.5-4	83.3	18.6
4-8	85.4	17.5
8-10	86.7	18.5
>10	86.7	19.4

Fuente: elaboración propia.

2.1.3.3. Elementos que componen un sistema de cultivo sin suelo

Según Andreau *et al.* (2015) los componentes básicos de un sistema de cultivo sin suelo son “las unidades de cultivo (macetas, canales, piletones, balsas, entre otros), el sustrato, el equipamiento de riego con solución nutritiva (automatismo, ordenadores y equipo de riego-fertirriego) y la tecnología y conocimiento necesario para el correcto manejo del sistema” (p. 76).

2.1.3.3.1. Solución nutritiva

La solución nutritiva es uno de los elementos más importantes dentro del sistema hidropónico debido a que es el medio por el cual los cultivos obtienen los nutrientes para su adecuado desarrollo. La solución nutritiva, como indica Baixauli y Aguilar (2002), “está compuesta por el agua de riego y los iones disueltos procedentes de la disolución de los abonos empleados para la formulación de dicha solución” (p. 62).

Estos nutrientes minerales deben estar presentes en la solución nutritiva en proporciones adecuadas, como indica Carbone (2015) “para que cumplan de manera correcta el rol que desempeñan en el metabolismo vegetal” (p. 15).

Los elementos esenciales que debe tener una solución nutritiva se clasifican en macronutrientes y micronutrientes; como enfatiza Andreau *et al.* (2015) “estos elementos se le deben proveer a las plantas en su forma más simple (como iones) para que estas los puedan asimilar. Es importante mantener un pH ligeramente ácido para que los nutrientes se mantengan disueltos” (p. 15).

Entre los factores que se deben de considerar en el análisis de la calidad agua en cultivos hidropónicos, según Carbone (2015) se encuentran los siguientes:

- Disponibilidad de oxígeno

La cantidad de oxígeno presente en la solución nutritiva es vital para la absorción iónica, ya que niveles bajos de oxígeno disminuyen la cantidad de hierro en los sistemas NFT. Tal como destaca Carbone (2015), en toda solución nutritiva “el oxígeno ayuda al correcto crecimiento y desarrollo de las raíces, ya que en un modelo aeróbico las células pueden respirar y generar energía metabólica (ATP) y en consecuencia absorber los nutrientes necesarios para el adecuado crecimiento” (p.17).

Según Zeroni (1983), el límite inferior de oxígeno disuelto recomendado para un cultivo hortícola y ornamental es de 3-4 mg L⁻¹. Valores por debajo de este límite tienen efectos negativos en los cultivos, ya que, como subraya Urrestarazu (2004) producen disminución en el crecimiento y oscurecimiento de las raíces, que es un indicador visual de un problema de hipoxia. Otra consecuencia puede ser el apareamiento de microorganismos no deseados, por ejemplo, *Phytium*, *Phytophthora*, entre otros” (p. 71).

Urrestarazu (2004) afirma que la importancia de la aireación de las raíces “se hace evidente al observar la estrecha relación entre la concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva o rizosfera y la productividad del cultivo” (p .1).

Algunos métodos para aportar oxígeno a la solución en los sistemas hidropónicos son: utilizar un compresor o bomba de aire para crear burbujeo de

aire en la solución (oxigenador/aireador de acuario), utilizar un agitador o aprovechar la caída del drenaje en el tanque de recogida.

- Temperatura

Debido a que las raíces de los cultivos se encuentran en contacto directo con la solución, la temperatura se debe encontrar dentro de los límites, ya que un incremento excesivo puede afectar el metabolismo molecular y causar incluso la muerte de las plantaciones. Carbone (2015) explica sobre el oxígeno que es “esencial para la vida celular, se disuelve mejor a bajas temperaturas que en aguas calientes, y que un incremento en la temperatura aumenta la absorción de iones K y fosfato, así como la tasa respiratoria de las raíces” (p. 43).

- Potencial de hidrógeno (pH)

El pH tiene un efecto directo en la absorción iónica de los cultivos, ya que un incremento del pH en la solución puede interrumpir en los cultivos la absorción de elementos como el hierro (Fe). Tal como lo sostiene Carbone (2015), “las soluciones con $\text{pH} \geq 7.5$ reducen la absorción de nitrato y fosfato; las que tienen $\text{pH} \leq 4$ disminuyen la absorción de potasio (K) produciendo un desbalance en la polaridad de las membranas celulares de las raíces” (p. 9).

Para medir el grado de alcalinidad o acidez presente en la solución se utiliza una escala de pH, la cual tiene un rango de 0 a 14. Como indica Sensorex (2018), “los números en la escala aumentan con el aumento de la alcalinidad, mientras que los números en la escala disminuyen con el aumento de la acidez” (p. 11). O sea que, mientras más alto sea el valor en la escala de pH, la solución será más alcalina y por el contrario, mientras más bajo su valor, la solución será más ácida.

También se puede decir que, en la escala de pH, “cada unidad de cambio representa un cambio diez veces mayor en la acidez o alcalinidad. El valor de pH también es igual al logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno o la actividad de iones de hidrógeno” (Sensorex, 2018, p.11).

Andreau *et al.* (2015) explica que la solución se debe encontrar dentro de un rango de 5.8 y 6.5, porque de lo contrario, los cultivos se verán afectados por deficiencia de nutrientes.

- Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) se define como “la capacidad que tiene una solución de transportar o conducir electricidad por unidad de área” (Andreau, *et al.* 2015, p. 23).

La conductividad eléctrica hacer referencia a la cantidad de sales presentes en la solución; este parámetro debe estar en un rango de 1.8 y 2.3 mmhos/cm, para no afectar la disponibilidad de nutrientes en la solución. La CE se mide en S/cm² o mhos/cm.

- Interacción entre iones

La cantidad de elementos presentes en la solución debe ser la adecuada, ya que la relación entre nutrientes puede darse de forma sinérgica o antagónica dependiendo de las concentraciones. Por ejemplo, Carbone (2015) expone el caso donde se da un exceso de absorción de potasio, lo cual “puede provocar dificultades para absorber magnesio y calcio, causando sintomatología de deficiencias de estos elementos” (p. 14).

Otra relación comprobada se da entre el nitrógeno y el fósforo, tal como señala Carbone (2015) “el exceso de amonio puede incluso provocar fitotoxicidad, reflejándose de forma visual, con graves quemaduras en hojas, también disminuye el pH de la solución y origina problemas de antagonismo con otros nutrientes”. Por lo que “el Amonio no debe aportar más de un 5-10% del Nitrógeno total, mientras que en invierno se puede suprimir el Amonio, ya que el N del nitrato de calcio es suficiente” (p. 11).

- Salinidad

Otro parámetro en la solución nutritiva que determina la salud de los cultivos es la salinidad, debido a que “altos contenidos de sales como iones sodio y cloruro en las soluciones nutritivas, afectan de manera directa a la absorción de los nutrientes” (Carbone, 2015, p. 11).

Figura 2. **Efecto de la variación de nutrientes en los cultivos**



Fuente: Carbone (2015). *Nutrición mineral*. Consultado el 12 de junio de 2022. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1.

Por lo tanto, “para tener una referencia general del estado del sistema y su funcionamiento, es necesario un monitoreo constante de variables de al menos una vez al día como la medición de riego aportado, pH y conductividad eléctrica” (Baixauli y Aguilar, 2002, p. 22).

2.1.4. Localización del huerto hidropónico urbano

Para la implementación de un huerto hidropónico urbano o periurbano (HHP) se puede hacer uso de cualquier espacio desaprovechado que garantice la calidad e inocuidad de los cultivos. Como recomienda Castañeda (1997) en el manual técnico de hidroponía popular, estos espacios pueden ser “dentro de centros educativos y residencias donde se disponga de un espacio, como paredes, techos, terrazas, patios, ventanas y cualquier espacio no utilizado” (p. 2), siempre que se cumpla con las siguientes características:

- Que el lugar disponga de seis horas como mínimo de luz solar.
- Que no esté bajo sombra de árboles o construcciones cercanas.
- Que disponga de una fuente de agua potable cercana al huerto.
- Que se tenga espacio para el almacenamiento y preparación de los nutrientes.
- Que se disponga de los elementos necesarios para proteger el huerto de animales domésticos para evitar que lo destruyan y contaminen.
- Que esté protegido por materiales de uso agrícola, de lluvia, sol o vientos fuertes, así como de posibles inundaciones.

- Que esté alejado de fuentes de contaminación como desagües, baños, letrinas o basureros.

Si su objetivo es la comercialización de las cosechas, adicional a cumplir las características mencionadas anteriormente se necesitará un espacio para que el huerto sea más amplio.

Marulanda e Izquierdo (2003) afirman que el área de la mayoría de las HHP instaladas varía entre 10-20 metros cuadrados, pero hay familias o grupos que cuentan con áreas de cultivo superiores a 200 metros cuadrados, lo que les permite comercializar su producción.

2.1.5. Ventajas y desventajas de los cultivos hidropónicos

Beltrano y Giménez (2015) mencionan algunas de las muchas ventajas de los cultivos hidropónicos relacionadas con la salud e inocuidad:

- “Cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminación
- Limpieza e higiene en el manejo del cultivo
- Productos libres de químicos no nutrientes
- Cultivos con mejor sanidad” (p. 18)

En relación con el aprovechamiento de los recursos:

- “Ahorro en el consumo del agua
- Ahorro de agua, que se puede reciclar
- Ahorro de fertilizantes e insecticidas
- Menos espacio y capital para una mayor producción” (p. 18)

Desde el punto de vista económico y comercial:

- “Mejor y mayor calidad del producto
- Altos rendimientos por unidad de superficie
- Productos con aceptación en el mercado por sus características organolépticas” (p. 18).

Según un enfoque productivo:

- “Aceleramiento en el proceso de cultivo
- Mayor precocidad de los cultivos
- Independencia de los fenómenos meteorológicos
- Se evita la maquinaria agrícola (tractores, rastras, entre otros)
- Alto porcentaje de automatización
- Posibilidad de cosechar repetidamente la misma especie de planta al año” (p. 18).

Una de las ventajas mencionadas en la producción de cultivos hidropónicos es una mayor precocidad de los mismos; esto quiere decir que el período de tiempo para el desarrollo del cultivo disminuye. Por ejemplo, el cultivo de lechuga en tierra tiene un ciclo de aproximadamente 3.5 meses antes del consumo; con la técnica de raíz flotante se pueden lograr cultivos a partir de su germinación, en un tiempo de 1.5 meses.

Entre las desventajas comunes que se presentan para la implementación de un HHP está el elevado costo inicial, lo cual puede variar según el método, tamaño del huerto, materiales y la tecnología que se va a utilizar. También se puede presentar como barrera la idea de que para desarrollar un HHP se requiere de alto conocimiento de las técnicas hidropónicas.

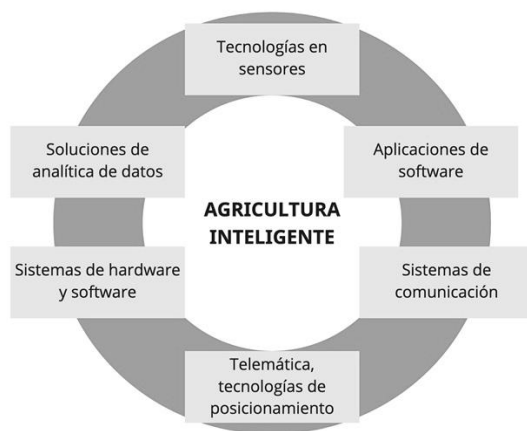
2.2. IoT en la agricultura, la agricultura inteligente

Smart Agriculture o *Smart Farming* son dos conceptos que nacen debido a Sciforce (2019) “la aplicación de las modernas tecnologías de la información y la comunicación al manejo de cultivos y granjas, con el objetivo de incrementar la calidad y cantidad de los cultivos, al mismo tiempo que optimiza la mano de obra humana” (p. 5).

Con la agricultura inteligente, el dueño y/o operador del huerto puede monitorear el estado de los cultivos y su entorno sin necesidad de estar en campo y con esta información tomar decisiones estratégicas para áreas específicas o en toda la granja. Entre las principales herramientas y tecnologías que se pueden integrar o aplicar en una granja inteligente, se encuentran las siguientes:

- Sensores: suelo, agua, luz, humedad, temperatura.
- Software: soluciones especializadas en distintos tipos de granjas o plataformas de IoT.
- Conectividad: celular, LoRa, Modbus, entre otros.
- Ubicación: GPS, satélite, entre otros.
- Robótica: tractores autónomos, drones, instalaciones de procesamiento u otros.
- Análisis de datos: IA, Big data, ML, entre otros.

Figura 3. **Tecnologías utilizadas en un ecosistema de agricultura inteligente**



Fuente: Sciforce. (2019). *Smart Farming: The Future of Agriculture*. Consultado el 15 de julio de 2022. Recuperado de <https://www.iotforall.com/smart-farming-future-of-agriculture/>.

Dentro del ecosistema de la agricultura inteligente, el IoT juega un papel importante como describe Sciforce (2019), “la fuerza impulsora de la agricultura inteligente es el IoT, el cual conecta máquinas inteligentes y sensores integrados en las granjas, para que los procesos agrícolas estén basados en los datos que se procesan y almacenan” (p. 3).

Las etapas que sigue la agricultura inteligente dentro de un ciclo son:

- Observación: el sensor mide los datos de los cultivos, suelo, condiciones climáticas, entre otros.
- Diagnóstico: los datos enviados por el sensor se analizan en una plataforma de IoT en la nube previamente parametrizada, para que

establezca las condiciones de lo que se mide y pueda detectar cualquier deficiencia o necesidad.

- Decisión: una vez identificados los problemas, el usuario y los sistemas, utilizando el aprendizaje automático de la plataforma de IoT, determinan si se requiere la acción en campo de alguna corrección.
- Acción: luego de evaluar y ejecutar la o las acciones correctivas, el ciclo se vuelve a iniciar.

Para lograr la transmisión de datos entre los sensores y la plataforma IoT, AdvanWISE, un impulsador y desarrollador de soluciones integradas de IoT orientado a la industria, puntualiza que la tecnología LPWAN es la adecuada, ya que permite la conexión entre dispositivos en campo durante un período prolongado de tiempo, como enviar pequeñas cantidades de datos a largas distancias.

Las tecnologías de IoT permiten la trazabilidad de los cultivos durante todas las etapas del proceso productivo hasta su consumo, ayudando con esto a mejorar la calidad e inocuidad, que será un común denominador en la industria agroalimentaria.

Esto se demuestra en un estudio del Instituto Español de Estudios Estratégicos (2018), donde se indica que la agricultura de precisión es y será cada vez más frecuente, de tal forma que “se desarrollarán aplicaciones como la previsión de plagas en cualquier plantación mediante la integración de modelos de inteligencia artificial, utilizando sensores que monitoreen, avisen y recomienden cuándo y cuánto insecticida es el adecuado” (p. 12).

Esta producción más eficiente y sostenible, basada en la precisión y optimización de los recursos, tiene un impacto directo en el medio ambiente, ya que se obtiene un uso eficiente del agua, insecticidas e insumos.

2.2.1. Internet de las cosas IoT

Evans y Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) expusieron que los inicios del IoT tuvieron lugar desde “el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), hasta llegar al trabajo del Auto-ID Center. Este grupo, fundado en 1999, realizaba investigaciones en el campo de la identificación por radiofrecuencia en red (RFID) y las tecnologías de sensores emergentes” (Evans y BSG, 2011, p. 2).

Mientras que Rose, *et al.* y la Internet Society (ISOC) (2015), señalan específicamente que el término IoT o idC, “fue empleado por primera vez en 1999 por el pionero británico Kevin Ashton para describir un sistema en el cual los objetos del mundo físico se podían conectar a Internet por medio de sensores” (p. 5).

Como expresa Rose, *et al.* (2015), sobre las distintas definiciones del término IoT, respecto de que “no son necesariamente contradictorias, sino que más bien enfatizan diferentes aspectos del fenómeno desde diferentes puntos de vista y casos de uso” (p. 5).

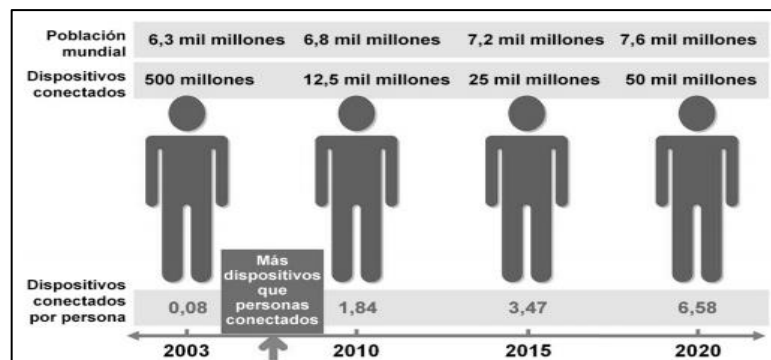
Rose, *et al.* (2015) sostienen que una definición del término IoT se refiere a “la ampliación de la conectividad de red y la capacidad de cómputo a objetos, dispositivos, sensores y elementos que habitualmente no se consideran computadoras” (p.18).

Estos objetos conectados a la red son capaces de generar, intercambiar y consumir datos muchas veces de forma remota, utilizando poca intervención humana. Se debe mencionar que existen modelos de redes en IoT cuya arquitectura de comunicación no utiliza Internet o una red basada en el protocolo IP; “no por eso se deben excluir de la definición de IoT, ya que el usuario final en algún punto deberá atravesar un *gateway* con conectividad IP para acceder a los datos” (Society, 2015, p. 18)

En este sentido etiéndase a Internet como “la capa física compuesta de *switches*, *routers* y otros equipos, encargada de transportar información de un punto a otro, de manera rápida, confiable y segura” (Evans e IBSG, 2011, p. 111).

Un dato interesante sobre el IoT es el que expone Cisco IBSG (2011), y es “ese momento en el tiempo en que hubo más cosas u objetos conectados a Internet que personas; esto sucedió en entre los años 2008 y 2009” (p. 2). Dicho suceso puede apreciarse en la siguiente gráfica:

Figura 4. **Internet de las cosas "nació" entre los años 2008 y 2009**



Fuente: Cisco IBSG (2011). *Índice de dispositivos conectados según estudio de CISCO*.

Recuperado de https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf.

Para determinar este momento en la historia, Cisco IBSG (2011) señala que se tomó la cantidad de dispositivos conectados a internet y se dividió entre la población mundial total (conectada a internet o no) de ese momento; esto dio como resultado 18.84 dispositivos por persona.

A pesar de que no se tenga una definición generalizada para el término IoT, hay que enfatizar que se trata de un tema emergente que promete transformar la forma en que se vive, con suma importancia en lo técnico, social y económico.

Según Evans e IBSG (2011), el IoT es la primera revolución real de Internet, “un salto que conducirá a aplicaciones revolucionarias con el potencial de mejorar drásticamente la manera en que las personas viven, aprenden, trabajan y se entretienen” (p. 6).

“IoT ya ha logrado que Internet sea sensorial (temperatura, presión, vibración, luz, humedad y estrés), lo que permite ser más proactivos y menos reactivos” (Evans e IBSG, 2011, p.6).

Debido a que IoT se encarga de alimentar grandes bases de datos de forma rápida y masiva, se deben utilizar nuevas técnicas de análisis, procesamiento y manejo de esta información, que permitan generar más conocimiento y sabiduría. Entre los retos y desafíos que conlleva implementar IoT, Rose, *et al.* (2015) señala algunos, entre ellos “la seguridad; la privacidad; la interoperabilidad y los estándares; cuestiones legales, reglamentarias y relacionadas con los derechos; economías emergentes y cuestiones relacionadas con el desarrollo” (p. 4).

También se deben contemplar aspectos importantes como afirman Evans e IBSG (2011), tales como “la implementación de IPv6, la energía para alimentar los sensores y el acuerdo sobre las normas” (p. 18).

En el contexto del desarrollo de esta investigación Rose *et al.* (2015) señalan que la tecnología de la IoT permite transformar la agricultura “mediante el aumento de la disponibilidad de información a lo largo de la cadena de valor de la producción por medio de sensores conectados en red” (p. 33).

2.2.1.1. Modelos de comunicación del IoT

El documento Request for Comments (RFC 7452) del Comité de Arquitectura de Internet (IAB) (2015), da las guías para la implementación de redes de dispositivos inteligentes y se describen cuatro modelos utilizados comúnmente para la comunicación entre elementos del IoT.

- Modelo de comunicación *Device-to-Device*

Rose *et al.* (2015) explican que “el modelo de comunicación dispositivo a dispositivo representa dos o más de dichos dispositivos que se conectan y comunican directamente entre sí y no a través de un servidor de aplicaciones intermediario” (p. 45).

Estos dispositivos se comunican sobre varios tipos de redes, sean estas IP o Internet, pero para la comunicación directa entre dispositivos por lo general se utilizan estándares de nivel físico de redes inalámbricas de radio de baja potencia como *bluetooth*, Z-Wave o IEEE 802.15.4 ZigBee.

Figura 5. **Modelo de comunicación Device-to-Device**



Fuente: Tschofenig, *et al.* (2015). *Architectural considerations in smart object networking*.

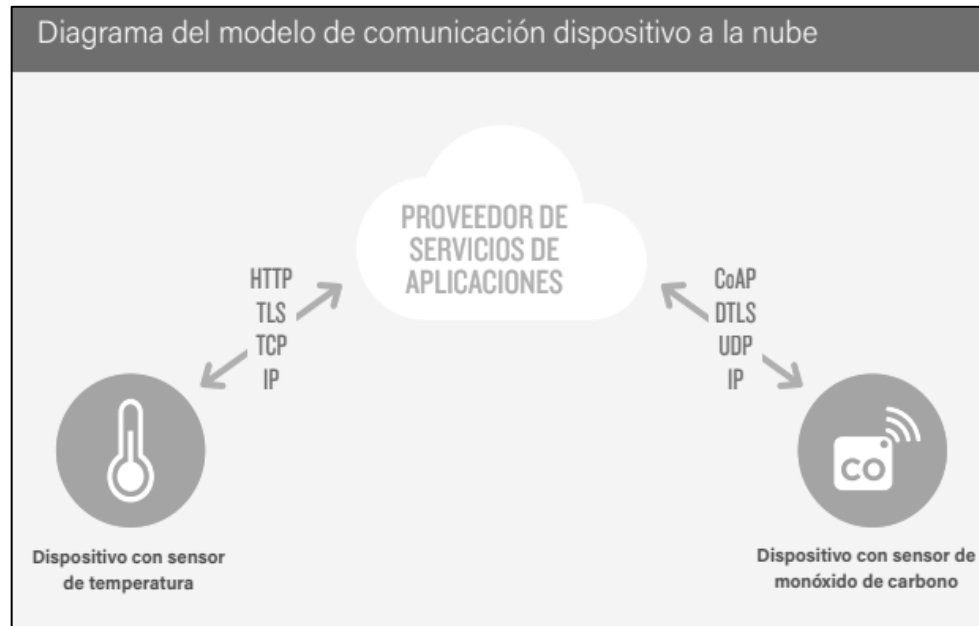
Consultado el 12 de agosto de 2022. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>.

- **Modelo de comunicación *Device-to-Cloud***

En este modelo de comunicación el dispositivo se conecta directamente a un servicio en la nube, que puede ser un proveedor de servicios de aplicaciones para publicar los datos y controlar el tráfico de mensajes. En este modelo es común utilizar comunicaciones tradicionales, como indica Rose *et al.* (2015) “por ejemplo, conexiones de radio de uso común como Wi-Fi o Ethernet tradicionales para establecer una conexión entre el dispositivo y la red IP, que luego se conecta con el servicio en la nube” (p. 23).

Entre las limitaciones que presenta este esquema se encuentra la dependencia a la infraestructura de proveedores de servicios, ya que se puede saturar por dispositivos de terceros o que el software o hardware se vuelva obsoleto e inutilizable. Por lo tanto, Tschofenig *et al.* (2015) exponen que “la interfaz de protocolo utilizada para comunicarse con la infraestructura del servidor debe estar disponible y pueden implementarse varios estándares como CoAP, Datagram Transport Layer Security (DTLS) (DTLS), UDP, IP, entre otros.”

Figura 6. **Modelo de comunicación *Device-to-Cloud***

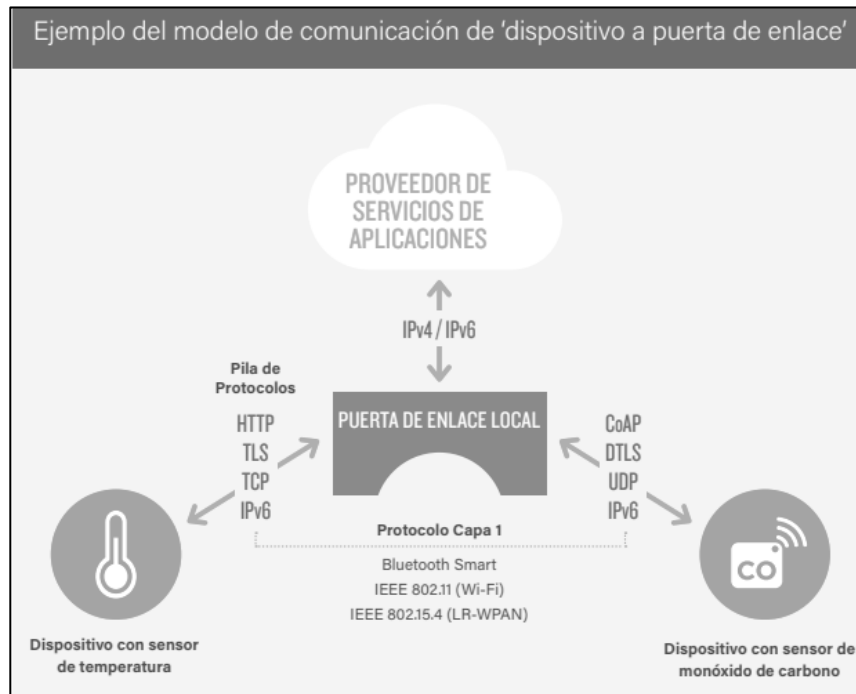


Fuente: Tschofenig (2015). *Architectural considerations in smart object networking*. Consultado el 15 de julio de 2022. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>

- **Modelo de comunicación *Device-to-Gateway***

En este modelo el dispositivo se conecta mediante una *gateway* para poder llegar a la nube. De acuerdo con Rose *et al.* (2015), “en el dispositivo de puerta de enlace local hay un software de aplicación corriendo, que actúa como intermediario entre el dispositivo y el servicio en la nube y provee seguridad y otras funcionalidades, tales como traducción de protocolos o datos” (p. 20).

Figura 7. **Modelo de comunicación *Device-to-Gateway***



Fuente: Tschofenig *et al.* (2015). *Architectural considerations in smart object networking*. Consultado el 15 de julio de 2022.. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>.

Tschofenig *et al.* (2015) declaran que la puerta de enlace debe estar conectada a Internet, ya que esto permite “implementaciones de objetos inteligentes que requieren capacidades de configuración remota e interacciones en tiempo real” (p. 18).

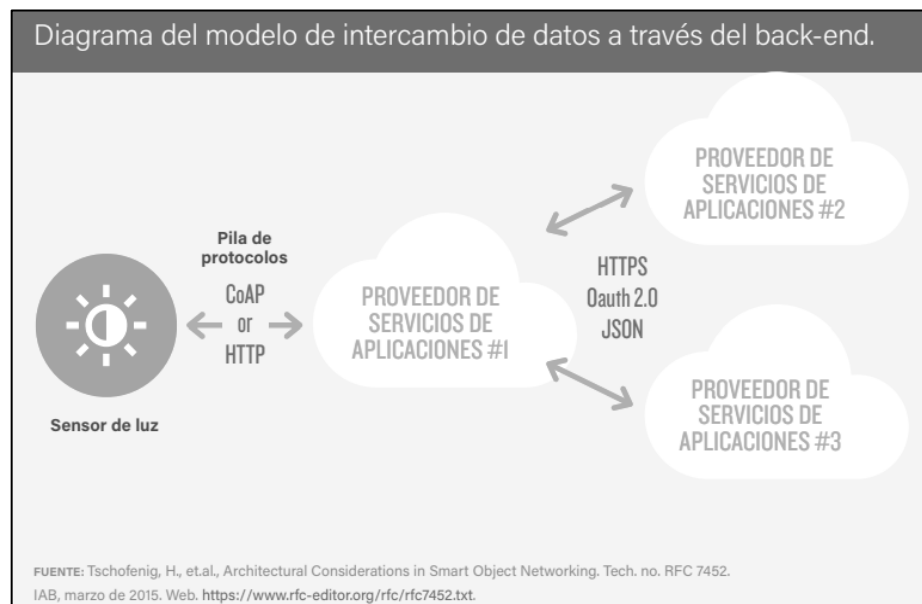
Una de las ventajas de este modelo como sostiene Rose *et al.* (2015) es que permite integrar dispositivos inteligentes en un sistema cuyos dispositivos no son interoperables de forma nativa. Mientras que entre las desventajas de este enfoque están “el costo y la complejidad que implican el desarrollo del software y el sistema para la puerta de enlace de capa de aplicación” (p. 22).

- Modelo de comunicación *Back-End Data Sharing*

En este modelo Rose *et al.* (2015) se refieren a “una arquitectura de comunicación que permite que los usuarios exporten y analicen datos de objetos inteligentes de un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes” (p. 5).

Para lograr esta interoperabilidad de los datos de distintos dispositivos en la nube, Tschofenig *et al.* (2015) indican que “se requiere un enfoque de interfaces de programación de aplicaciones (APIs) en combinación con servicios que posean tecnología de autorización y autenticación federada, como OAuth 2.0” (p. 13).

Figura 8. **Modelo de comunicación *Back-End Data Sharing***



Fuente: Tschofenig (2015). *Architectural considerations in smart object networking*. Consultado el 18 de julio de 2022. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>.

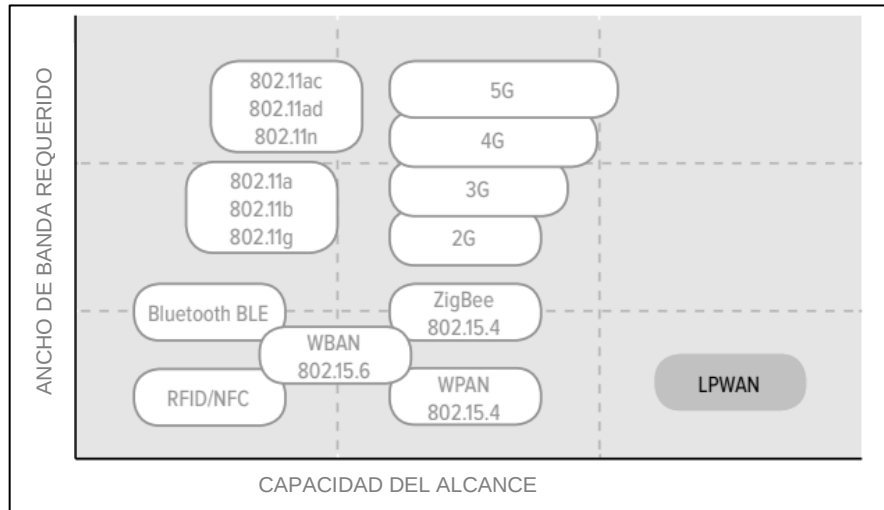
La comunicación entre dispositivos IoT se puede llevar a cabo de forma alámbrica con una red LAN cableada o de forma inalámbrica con una red de radio de largo alcance como LoraWAN. En aplicaciones industriales es común la comunicación cableada con protocolo industrial Modbus RTU o IP. El *gateway* o *datalogger* se encarga de gestionar múltiples nodos y a la vez envía los datos hacia un *publisher* mediante MQTT IP. Los conceptos se presentan a continuación.

2.2.2. Redes de área amplia de baja potencia – LPWAN

Para aplicaciones de IoT donde se requiere el envío de pequeñas cantidades de datos, Link Labs Inc (2016) asegura que utilizar una red LPWAN es adecuado, ya que permite enviar paquetes entre 20 a 256 *bytes* por mensaje varias veces al día, con un alcance de hasta 10 kilómetros del *gateway* y con una larga duración de la batería que ronda entre 5 a 10 años. Los ejemplos de su aplicación incluyen medición de agua o gas en grandes áreas, agricultura e iluminación inteligente, sensores de parqueo y GPS.

Las características de alcance y ancho de banda, hacen que LPWAN sea una buena alternativa a las conexiones celulares M2M. Tal como se observa en la figura 9, sus capacidades se encuentran fuera de lo que las tecnologías inalámbricas soportan actualmente:

Figura 9. **Ancho de banda vs. rango de cobertura de redes inalámbricas**

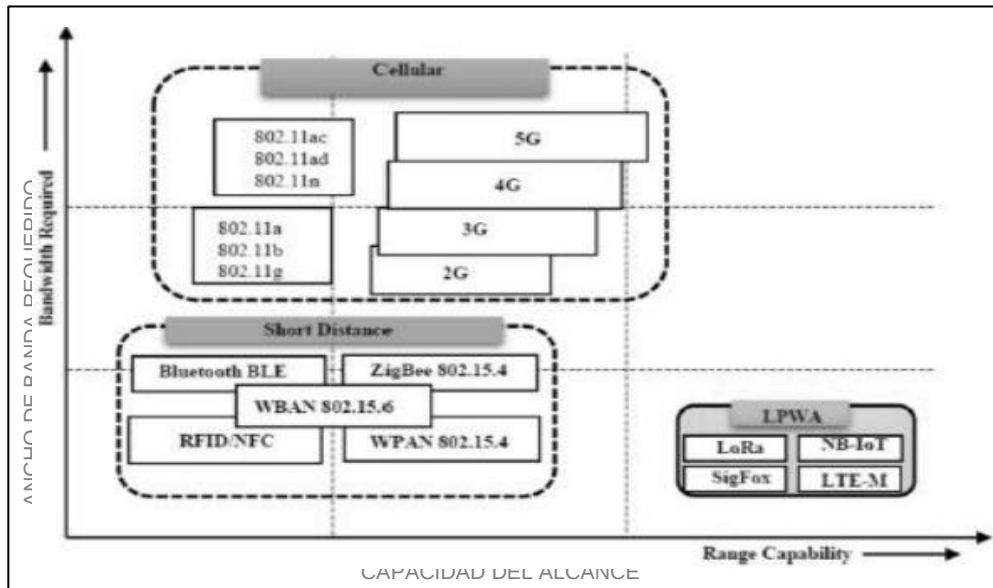


Fuente: Egli (2016). *An introduction to mqtt, a protocol for m2m and iot applications*. Consultado el 2 de agosto de 2022. Recuperado de http://www.indigoo.com/dox/wsmw/1_Middleware/MQTT.pdf.

2.2.2.1. Plataformas y tecnologías basadas en LPWAN

Dentro de la tecnología LPWAN existen distintas plataformas, proveedores y desarrollos, basadas en tecnologías LTE o celular tradicional, así como protocolos libres y privados. En esta sección se describe cada tecnología LPWAN.

Figura 10. Ancho de banda vs. rango de corta distancia, celular y LPWA



Fuente: Madhumitha e International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology (2019). *Required bandwidth vs. range capacity of short distance, cellular, and LPWA. A survey on LPWAN technologies in content to IoT applications.* Consultado el 18 de julio de 2022. Recuperado de www.ijariit.com

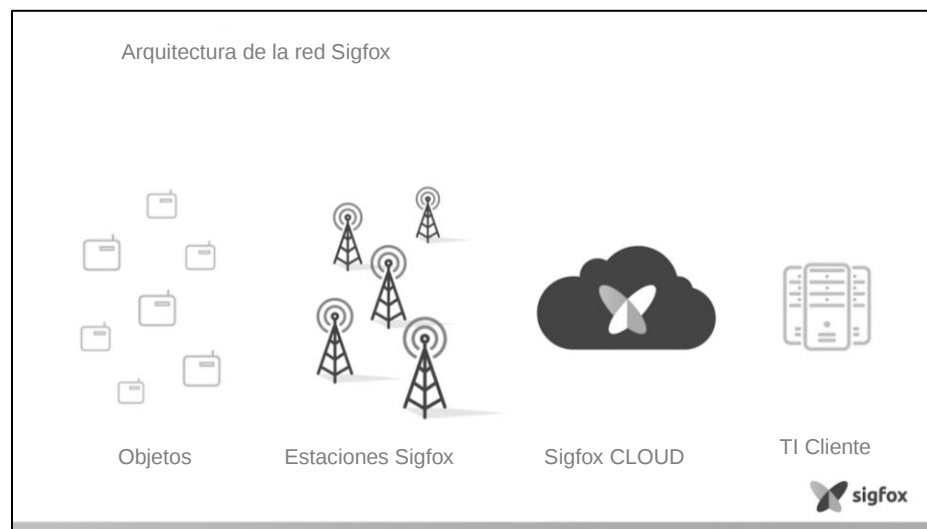
2.2.2.1.1. SigFox

Esta tecnología realiza el intercambio de mensajes de forma inalámbrica utilizando una modulación de banda ultra estrecha operando en la frecuencia de banda pública de 200 kHz. Sigfox (s.f.) apunta que se logran largas distancias con alta resistencia al ruido debido a que “se envían cantidades muy pequeñas de datos (12 bytes) de forma muy lenta (300 baudios)” adicional, “cada mensaje tiene un ancho de banda de 100 Hz y se transfiere a una velocidad de 100 o 600 bits por segundo, dependiendo de la región” (p. 25).

Link Labs Inc. (2016) subraya que para implementar Sigfox se deben instalar antenas en torres (como una compañía celular) y desde ahí se reciben transmisiones de datos de dispositivos como sensores de estacionamiento o medidores de agua. Sigfox está dirigido a dispositivos muy simples y aplicaciones que necesiten enviar pequeñas cantidades de datos de forma poco frecuente, como sistemas de alarma básicos, monitoreo de ubicación y mediciones simples.

Sigfox utiliza una topología estrella, donde los dispositivos se conectan a cualquier estación base que se encuentre en el rango, a diferencia de los protocolos celulares, donde el dispositivo se conecta a una estación base específica.

Figura 11. **Arquitectura de red Sigfox**



Fuente: Sigfox. (s.f.). *Sigfox Technology Overview*. Consultado el 2 de agosto de 2022.

Recuperado de <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>.

2.2.2.1.2. Symphony Link

Link Labs, fabricante de componentes compatibles con el estándar LoRa Alliance, desarrolló su propio sistema LPWAN llamado Symphony Link. Como indica Link Labs Inc. (2016) Symphony Link “utiliza la capa física de LoRa pero no la arquitectura estándar de LoRaWAN MAC. Tiene un alcance 100 veces mayor que el de WiFi y como en casi todas las soluciones LPWAN, es mucho más rentable que las redes celulares” (p. 11).

Según LinkLabs (s.f), Symphony Link es flexible para implementaciones con o sin licencia en el rango de banda de 150 MHz a 1 GHz debido a que su puerta de enlace, “es una estación base de ocho canales por debajo de los GHz y los módulos transductores diseñados para permitir comunicaciones de largo alcance, operan en la banda ISM de 915 MHz” (p. 2).

Debido a que es un sistema propietario y basado en LoRa, se requiere utilizar dentro de su arquitectura dispositivos con hardware LoRa, así como software del fabricante, lo que puede limitar su implementación.

2.2.2.1.3. Weightless

Weightless es un estándar abierto. El protocolo puede operar tanto en licencia libre como en espectro licenciado por debajo de 1GHz.

Raza *et al.* (2017) indican que existe tres estándares abiertos de LPWA propuestos por la Weightless Special Interest Group, cada uno con características, rango y consumo de energía diferentes: el primero, Weightless-W es compatible con varios esquemas de modulación, incluida la modulación de amplitud en cuadratura 16 (16-QAM), BPSK diferencial (DBPSK) y una amplia

gama de factores de propagación. Raza *et al.* (2017) indica que “dependiendo del presupuesto del enlace, los paquetes que tienen tamaños en más de 10 bytes pueden transmitirse a una velocidad de entre 1 kbps y 10 Mbps” (p. 16).

Link Labs, Inc (2016), por otro lado, estipula que “a pesar de que se ejecuta fuera del espectro de TV no utilizado, tiene algunos inconvenientes como una vida útil de la batería más corta (tres a cinco años) y un mayor costo tanto para el terminal como para la red” (p. 28).

Weightless-N también es un estándar de banda ultra estrecha para la comunicación de una sola vía entre los dispositivos finales y la estación base, con lo que se logra eficiencia energética significativa y un menor costo que los otros estándares de Weightless. Según Raza *et al.* (2017) “utiliza el esquema de modulación DBPSK en bandas SUB-GHZ; sin embargo, la comunicación unidireccional limita el número de casos de uso para Weightless-N” (p. 12).

Por último, Weightless-P “combina conectividad bidireccional con dos capas físicas no propietarias.” Raza *et al.* (2017) indica que “modula las señales utilizando GMSK y Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). Cada canal estrecho de 12.5 kHz en la banda ISM de SUB-GHZ ofrece una velocidad de datos en el rango entre 0.2 kbps y 100 kbps” (p. 12).

Entre las ventajas que ofrecen los protocolos con comunicación bidireccional está la de permitir actualizaciones de firmware de forma inalámbrica.

2.2.2.1.4. Nwave

Como se manifiesta en un estudio reciente de Brown y Lux Research Inc. (s.f.) la compañía Nwave es una de las mayores proponentes comerciales de la tecnología Weightless. Opera en una radio de banda ultra estrecha (UNB), que opera por debajo de 1 GHz en bandas ISM y opera una topología en estrella, lo que permite la comunicación directa de la estación base.

Los desarrollos en las redes celulares tradicionales, Brown y Lux Research Inc. (s.f.) indican que están mejorando su idoneidad para aplicaciones de IoT, tales como el LTE de bajo consumo y bajo ancho de banda como LTE-MTC, NB-LTE-M y NB-IoT (conocido como CAT -M1 y CAT-M2).

Mientras la red celular tradicional (2G, 3G y 4G LTE) sigue siendo la más adecuada para aplicaciones que requieren un mayor ancho de banda, no es tan rentable como las redes LPWAN para una gran cantidad de aplicaciones de IoT.

2.2.2.1.5. NB-IoT

Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT) es una tecnología celular que junto a LTE mejorado para *Machine Type Communications* (eMTC) y *Extended Coverage* GSM (EC-GSM), fueron desarrollados por la *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), los cuales como enfatiza Raza *et al.* (2017) “nacen de la necesidad de cubrir el mercado del IoT y M2M utilizando la infraestructura celular existente” (p. 10).

Mekki *et al.* (2018) remarcen que NB-IoT opera a una frecuencia de 200 KHz, por lo que comparte recursos en la transmisión GSM, GPRS y LTE.

De acuerdo con Mekki *et al.* (2018), NB-IoT permite la conectividad de más de 100 K dispositivos por celda. Mientras que Raza *et al.* (2017) asegura que NB-IoT alcanza una cobertura de 164 dB “donde pueden conectarse hasta 50 K dispositivos finales, lo cual podría incrementarse agregando más portadoras y que en tema de duración de batería, puede alcanzar una duración de 10 años transmitiendo 200 *bytes* de datos por día en promedio” (p. 11).

Cabe destacar que NB-IoT utiliza una banda licenciada, lo que la hace más estable, pero a la vez su implementación se vuelve compleja y su cobertura va a depender del operador celular.

2.2.2.1.6. LoRa®

LoRa® es una modulación de radio de espectro ensanchado, patentada en 2013 (EP2763321) y en 2008 (US7791415); fue desarrollada por Cycleo en Grenoble, Francia y adquirida por Semtech en el 2012. “LoRa® es la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear un enlace de comunicación de largo alcance” (LoRa® Alliance, 2015, p. 5).

LoRa es la abreviación de *Long Range*; característica principal de esta tecnología inalámbrica. En el modelo OSI se encuentra en la capa física y utiliza frecuencias que van de 137 MHz a 1020 MHz. Prajzler y Lorient (2015) denotan que “este rango incluye numerosas bandas ISM sin licencia, como 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Este es un elemento clave para implementaciones e interoperabilidad de bajo costo en todo el mundo” (p. 5).

Mientras que la mayoría de sistemas inalámbricos utilizan la modulación de cambio de frecuencia (FSK) como capa física, LoRa utiliza modulación *Chirp Spread*, la cual posee las mismas características de baja potencia que la

modulación FSK pero aumenta significativamente el rango de comunicación (LoRa® Alliance, 2015).

Debido a su largo alcance, una única puerta de enlace o estación base puede cubrir ciudades enteras o cientos de kilómetros cuadrados. LoRa® Alliance (2015) indica que “el rango depende en gran medida del entorno o de las obstrucciones en una ubicación determinada, pero LoRa® y LoRaWAN™ tienen un presupuesto de enlace (*link budget*) mayor que cualquier otra tecnología de comunicación estandarizada” (p. 6).

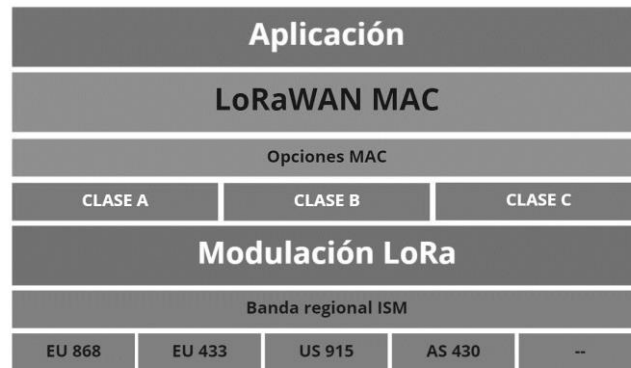
En condiciones ideales, con LoRa se pueden alcanzar velocidades de transmisión de datos de hasta 11 kbps y ahorro de batería. Los dispositivos con una calidad de enlace deficiente pueden aumentar el *link budget* al utilizar tasas de datos más bajas, lo que extiende el alcance del enlace a más de 30 km en línea vista.

2.2.3. Especificación LoraWAN

“LoRaWAN, en el modelo OSI, correspondería a la capa MAC, el cual es un estándar abierto de LPWAN de alta capacidad, largo alcance y bajo consumo de energía para redes IoT de nodos LoRa” de acuerdo con Prajzler y Lorient (2015, p. 3)

La especificación define los parámetros de la capa física de dispositivo a infraestructura (LoRa®) y el protocolo (LoRaWAN), lo cual garantiza interoperabilidad entre redes y fabricantes de todo el mundo.

Figura 12. **Protocolo LoRaWAN (Semtech)**



Fuente: Semtech, (s.f.). *What is LoRa®? Semtech LoRa Technology*. Consultado el 2 de agosto de 2022. Recuperado de <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.

El protocolo es bidireccional, lo que permite la entrega de mensajes de forma confiable. Además, define el cifrado *End to end* para seguridad y privacidad de los datos, registro vía aérea de los nodos finales y la capacidad de multidifusión.

Mekki *et al.* (2018) afirman que para abordar las diferentes latencias en las aplicaciones de IoT, LoRaWAN define múltiples clases de comunicación:

- Clase A: dispositivos finales bidireccionales.
- Clase B: dispositivos finales bidireccionales con espacios de recepción programadas.
- Clase C: dispositivos finales bidireccionales con lapsos de recepción máximas.

2.2.3.1. Banda ISM

Las bandas de radio ISM son frecuencias reservadas internacionalmente para el uso industrial, científico y médico. Los dispositivos que operen en estas bandas, como indica Ofcom (2017) “deben tolerar cualquier interferencia generada por las aplicaciones de ISM y los usuarios no tienen protección reglamentaria contra la operación del dispositivo ISM” (p. 2).

Según la Ley General de Telecomunicaciones de Guatemala, la clasificación de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico es la siguiente:

- Bandas de frecuencias para radioaficionados: pueden ser utilizadas por radioaficionados, sin necesidad de obtener derechos de usufructo.
- Bandas de frecuencias reservadas: destinadas para uso de los organismos y entidades estatales.
- Bandas de frecuencias reguladas: solo podrán utilizarse adquiriendo previamente los derechos de usufructo.

La tabla siguiente muestra las áreas compatibles con cada versión de LoRaWAN (Libelium Comunicaciones Distribuidas S. L., 2018).

Tabla V. **Compatibilidad de frecuencias LoRaWAN según la región**

Región	Supported by
EU 863-870 MHz ISM Band (Europe)	LoRaWAN EU
US 902-928 MHz ISM Band (United States)	LoRaWAN US
CN 779-787 MHz ISM Band (China)	Not supported
AU 915-928 MHz ISM Band (Australia)	LoRaWAN AU
CN 470-510 MHz ISM Band (China)	Not supported
AS 923 MHz ISM Band (ASEAN)	LoRaWAN ASIA-PAC / LATAM
AS 923 MHz ISM Band (ASEAN)	LoRaWAN ASIA-PAC / LATAM
	LoRaWAN JP / KR (special for Japan)
KR 920-923 MHz ISM Band (South Korea)	LoRaWAN JP / KR
INDIA 865-867 ISM Band (India)	LoRaWAN IN

Fuente: Libelium Comunicaciones Distribuidas S. L., (2018). *Regional compatibility table Waspote LoRaWAN Networking Guide*. Consultado el 18 de julio de 2022. Recuperado de <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>

De acuerdo con Carvera (2005) la clave de las nuevas redes de telecomunicación inalámbrica es el espectro radioeléctrico y el uso de bandas no licenciadas, conocidas como bandas ISM. Sin embargo, su uso está masificado y por consiguiente, el nivel de potencia interferente puede llegar a ser muy elevado.

2.2.3.2. Configuración de red

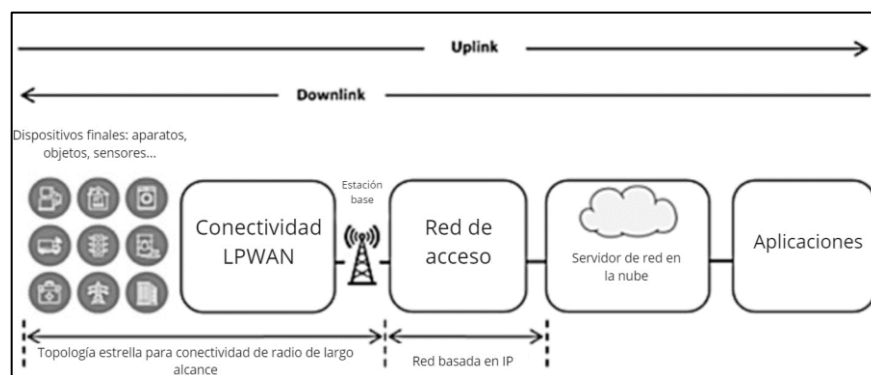
Las principales tecnologías LPWAN implementan una topología en forma de estrella, similar al WiFi, en donde los puntos finales están conectados directamente al punto de acceso.

Las ventajas de una red en estrella es que se pueden añadir repetidores para tener una mejor cobertura, lo cual permite mejorar la latencia, confiabilidad y cobertura. Además, como las estaciones base están siempre encendidas, se garantiza el acceso inmediato a los dispositivos finales conectados.

Como expresa Link Labs Inc (2016), algunas topologías como la Mesh utilizada por ZigBee, tienen problemas para enviar datos a más de 20-30 metros de distancia porque la energía que proviene del transmisor se pierde demasiado rápido. Mekki et al. (2018) distingue las dos formas de comunicación en la topología estrella como *uplink* y *downlink*. LPWAN se diseñó en sus inicios solo para transmisión de enlace *uplink*, pero la transmisión de enlace *downlink* también está disponible en Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT.

En la transmisión *uplink* el dispositivo final envía mensajes hacia la estación base, este lo reenvía al servidor *backend* utilizando una red basada en IP y se comprueba la autenticación y autorización de mensajes para posteriormente reenviar el mensaje al servidor de aplicaciones. Para la transmisión *downlink*, el servidor de aplicaciones envía un mensaje al servidor de red y este lo renvía a la estación base correspondiente, que luego lo dirige al dispositivo final.

Figura 13. **Topología de red para implementación de IoT con Sigfox, LoRaWAN o NB-IoT**



Fuente: Mekki et al.(2018). *Network topology of IoT deployment using Sigfox, LoRaWAN, or NB-IoT*. Consultado el 3 de agosto de 2022. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/percomw.2018.8480255>

2018.8480255

En el área de la agricultura, debido a que las condiciones del ambiente no cambian radicalmente, los dispositivos actualizan los datos sensados pocas veces al día en comparación con otras aplicaciones. Es por esto que Sigfox y LoRaWAN son ideales para esta aplicación. Adicional a esto, existen áreas rurales que no cuentan con cobertura celular LTE, por lo que tecnologías como NB-IoT no son adecuadas para aplicaciones de IoT en áreas agrícolas rurales.

2.2.4. Protocolos y plataformas IoT

En un estudio reciente, Dolui (2017) destaca que las plataformas de IoT cumplen con tres servicios básicos: almacenamiento, procesamiento y acceso remoto a los datos. También indica que “existen dos formas de comunicación entre el *gateway* y la plataforma según el modelo de mensajería, que pueden ser protocolos de solicitud-respuesta y los protocolos de mensajes de paso” (p.1).

En el modelo solicitud-respuesta, se definen dos participantes principales: cliente y servidor. Entre los principales protocolos de este tipo se encuentran *Hyper Text Transfer Protocol* (HTTP) y *Constrained Application Protocol* (CoAP) (Dolui, 2017).

Por otro lado, en el modelo de mensajería de paso, Dolui (2017) indica que los clientes siguen el intercambio de mensajes mediante el *broker*, el cual tiene la función de mediador entre clientes que pueden producir o consumir datos. Los protocolos de este tipo utilizados comúnmente para IoT son MQTT y *Advanced Message Queue Protocol* (AMQP).

Se presenta un cuadro comparativo con las distintas características de las plataformas IoT disponibles, cuya elección dependerá de las características del proyecto de IoT a desarrollar:

Tabla VI. Comparación de las plataformas web para IoT

Plataforma	Protocolo	Métrica de costeo	Seguridad	Modelo de interacción	Apertura	Librerías (Dispositivos)	Dispositivos soportados	Librerías (Aplicaciones)
Xively	HTTP, MQTT	No especifica	Llaves API, Open Autorización para terceros	Se envían los datos desde los dispositivos, se extraen datos usando aplicaciones	Propietario	C, Python	Arduino	JavaScript, Objective, PHP, Ruby, Python, Aplicaciones desarrolladas por Android
IBM IoT Foundation	HTTP, MQTT	Cantidad de datos intercambiados y procesados	Llaves API, certificaciones	Se envían datos desde los dispositivos hacia la nube, las aplicaciones extraen los datos desde los dispositivos y la nube	Propietario	Python, Java, Node.js, C#	Cualquier dispositivo que corra SDK	Node.js, Python, C#
Sense IoT	HTTP	Por 1000 llamadas API	Usuario, contraseña bash con ID de sesión, Open Autorización para terceros	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen datos usando aplicaciones	Propietario	C, Python	Arduino, Electric Imp, Rpi	PHP, Python, Aplicaciones desarrolladas por Android e iOS, Javascript
Thingspeak	HTTP	Gratis en el punto final ofrecido	Llaves API	Se envían datos desde los dispositivos	Código abierto	MATLAB, Python	Arduino, Electric Imp, Rpi	MATLAB, Ruby 2
Ubidots	HTTP	Número de variables visualizadas	Tokens / Llaves API	Se envían datos desde los dispositivos	Propietario	C, Python, Java	Arduino, Rpi, Spark Core, Electric Imp	Python, Java, C, PHP, NodeJS, Ruby, LabView
Sparkfun (phant.io)	HTTP	Gratis en el punto final ofrecido	Llaves API	Se envían datos desde los dispositivos	Código abierto	C, Python, Java, Node.js, C#, Ruby	Rpi, BBB, Electric Imp, WiFly	No especifica
AWS IoT	HTTP, MQTT, Websockets	Por 1 millón de consultas, modulo basado en precio	Certificados, grupos de usuarios y políticas de autorización	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen datos usando aplicaciones	Propietario	SDK en C y NodeJS	Arduino	C, NodeJS
mBed	CoAP	Gratis en el punto final ofrecido	Librerías TLS para autenticación Web	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen datos desde dispositivos	Código abierto	C++	Cualquier dispositivo que corra mBed OS	No especifica

Continuación de la tabla VI.

SicsthSense	HTTP, MQTT	Gratis en el punto final ofrecido	Llaves API	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen datos usando aplicaciones	Código abierto	JSON	Cualquier dispositivo que corra SDK	Python, Aplicaciones desarrolladas por Android
Azure IoT Hub	HTTP, MQTT, AMQP	Numero de aplicaciones, uso de espacio de disco	Tokens, cadenas de conexión	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen mensajes desde el dispositivo	Propietario	.NET, C, NodeJS, Java	Cualquier dispositivo que corra SDK	Node.js, Java
Parse	HTTP	Gratis en el punto final ofrecido (hasta 2017)	Llave API, ID de aplicación	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen notificaciones para aplicaciones	Código abierto	C, EmbeddedC	Arduino	JavaScript, PHP, .Net
ThingPlus	HTTP	Dispositivos finales y triggers	Open Authorization	Se envían datos desde los dispositivos, se extraen datos usando aplicaciones	Propietario	C (Arduino)	Arduino, Beaglebone, Raspberry Pi, Edison	No especifica

Fuente: Dolui y Politecnico (2017). *Comparison of cloud platforms based on our taxonomy*. Consultado el 2 de agosto de 2022. Recuperado de https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/131959/3/2016_12_DOLUI.pdf.

2.2.4.1. MQTT

Yuan e IBM Corporation (2018) describen el protocolo de transporte de telemetría MQ (MQTT) como “un protocolo de red liviano y flexible que ofrece mayor equilibrio para los desarrolladores de IoT, en comparación con otros protocolos de red populares como HTTP” (p. 5).

Entre las ventajas de MQTT frente a protocolos como HTTP es que HTTP es, por ejemplo, un protocolo síncrono, unidireccional, con transmisión uno a uno, pesado y con muchas reglas y encabezados.

Egli (2016) describe las principales características del protocolo MQTT:

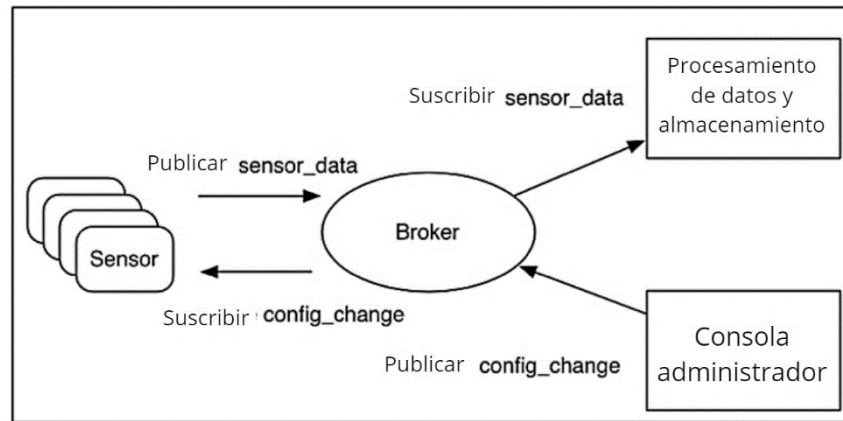
- Modelo de comunicación asíncrona con mensajes.
- Baja sobrecarga (encabezado de 2 *bytes*) para aplicaciones de bajo ancho de banda.
- Se ejecuta en TCP, para ser utilizado en conjunto con 6LoWPAN (compresión de cabecera TCP).
- Satisface las interrupciones de la red inalámbrica.

Además, por tratarse de un protocolo de sistema de mensajes, separa el productor de datos (editor) y del consumidor de datos (suscriptor) a través de temas (colas de mensajes), por lo cual:

- Es un modelo de publicación / suscripción (PubSub).
- Protocolo de colas y transporte de mensajes ligero.
- Protocolo simple, dirigido a implementaciones de baja complejidad, bajo consumo de energía y espacio reducido (por ejemplo, WSN - Redes de sensores inalámbricos).

El protocolo MQTT define dos tipos de entidades en la red, bróker y clientes. Según Yuan (2017), el bróker es un servidor que recibe todos los mensajes de los clientes y los redirige a los clientes de destino. Mientras que un cliente es “cualquier cosa que pueda interactuar con el bróker y recibir mensajes. Un cliente puede ser un sensor de IoT en campo o una aplicación en un centro de datos que procesa datos de IoT” (p. 2).

Figura 14. **Modelo de publicación - suscripción utilizado por MQTT**



Fuente: Yuan y IBM Corporation (2018). *El modelo de publicación y de suscripción de MQTT para sensores de IoT*. Consultado el 24 de julio de 2022. Recuperado de <https://www.ibm.com/developerWorks/ssa/>.

Los mensajes en MQTT se publican en topics o temas. Los temas se publican y se tratan como una jerarquía, como indica Tigli (2016) se utiliza una barra (/) como separador, lo cual permite crear arreglos razonables de temas comunes, de la misma manera que un sistema de archivos.

Por ejemplo, varios sensores pueden publicar los valores de pH de un invernadero sobre el siguiente tema, con su propio sensor y el nombre del invernadero reemplazados, según corresponda:

sensores / NOMBRE_SENSOR / pH / NOMBRE_INVERNADERO

Para comenzar con el desarrollo de proyectos utilizando MQTT existen diferentes herramientas disponibles en el medio. El módulo *Python mosquitto* es la opción más fácil de usar según Yuan e IBM Corporation (2018), ya que “forma

parte del proyecto Eclipse Paho y proporciona SDKs y bibliotecas de MQTT en varios lenguajes de programación” (p. 4).

Esta herramienta contiene un bróker de MQTT que, Yuan e IBM Corporation (2018) apuntan “puede ser ejecutado en una computadora local y herramientas de línea de comandos que pueden interactuar con el bróker usando mensajes. Es posible descargar e instalar el módulo mosquitto en el sitio web de Mosquitto” (p. 45).

Para implementaciones de IoT, donde se requiere de un protocolo de comunicaciones ligero, MQTT es adecuado porque permite comunicación bidireccional de forma confiable utilizando poco ancho de banda.

2.2.4.2. Mosquitto

Mosquitto incluye el protocolo MQTT y tiene la función de mediador de mensajes. Es de código abierto, lo que supone una ventaja para los desarrolladores, ya que su uso no está restringido, tal como lo sostiene Valle Hernández (s.f.).

Mosquitto implementa MQTT versión 3.1, lo cual según Tigli (2016) lo hace adecuado para mensajes de máquina a máquina, como con sensores de baja potencia o dispositivos móviles, computadoras integradas o microcontroladores, tal es el caso de Arduino.

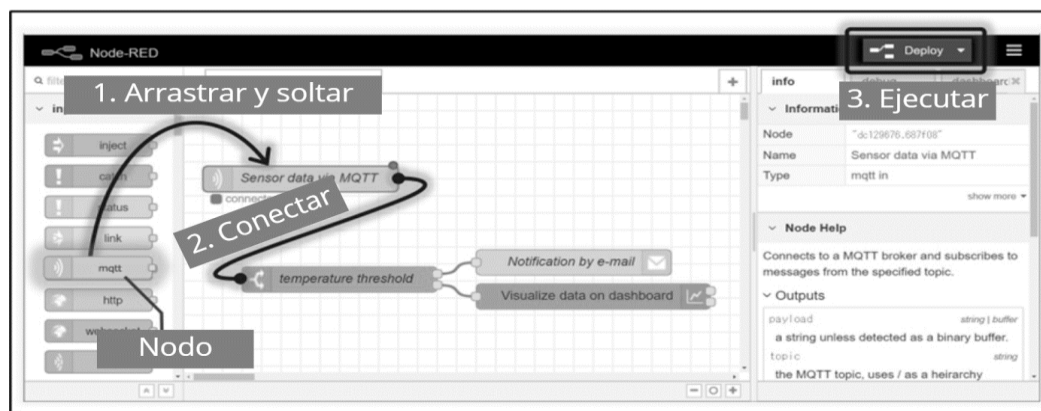
Se recomienda instalar el bróker en un servidor que debe estar encendido siempre para que el protocolo MQTT esté en constante disponibilidad. Se tienen diferentes opciones de servidores que puede ser local o en la nube.

2.2.4.3. Node-RED

Node-RED es un editor visual de código abierto desarrollado por el equipo de Servicios de Tecnología Emergentes de IBM y ahora parte de la fundación JS. Node-RED. Este programa facilita la programación para conectar el internet de las cosas, APIs y servicios en línea debido a su estructura visual que permite crear relaciones y funciones, así como añadir o eliminar nodos para lograr comunicación entre ellos. Como lo remarca *Mobberley y Adafruit Industries* (s.f.) un nodo en Node-RED, “puede ir desde un simple nodo de depuración para poder ver lo que está sucediendo en su flujo, hasta uno de Raspberry Pi que le permite leer y escribir en los pines GPIO” (p. 8).

Takaya *et al.* (2018) subrayan que Node-RED cuenta con más de 1,400 nodos disponibles, incluida la tecnología esencial para aplicaciones de IoT:

Figura 15. Flujo en Node-RED



Fuente: Takaya *et al.* (2018). *Introduction of the IoT Platform Node-RED and Hitachi's Activities*. Consultado el 25 de julio de 2022. Recuperado de https://events.linuxfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/Introduction-of-the-IoT-Platform-Node-RED-and-Hitachi_s-Activities-OSS-Takaya-Ide-_Kazuki-Nakanishi.pdf.

Como se visualiza en la página nodered.org, Node-RED consiste en rutinas basadas en Node.js al cual se puede acceder mediante un navegador web. Dentro del navegador se crea la aplicación arrastrando los nodos de la paleta a un área de trabajo y conectándolos. La aplicación se implementa donde la rutina está corriendo. La paleta de nodos se puede ampliar instalando nuevos nodos creados por la comunidad; se encuentran, por ejemplo, en la página <http://flows.nodered.org/>. Los flujos que se crean se pueden compartir fácilmente como archivos JSON.

2.2.4.4. Tecnologías móviles

Las tecnologías móviles se dividen comúnmente en generaciones, donde la primera generación (1G) comienza con los sistemas análogos móviles a partir de 1980. La siguiente generación, 2G, fue el primer sistema digital móvil y la tercera generación, 3G, fue el primer sistema que manejó datos en banda ancha. La siguiente generación, 4G o Long-Term Evolution (LTE), provee un mejor soporte para la banda ancha móvil, según lo expresa Dahlman *et al.* (2011).

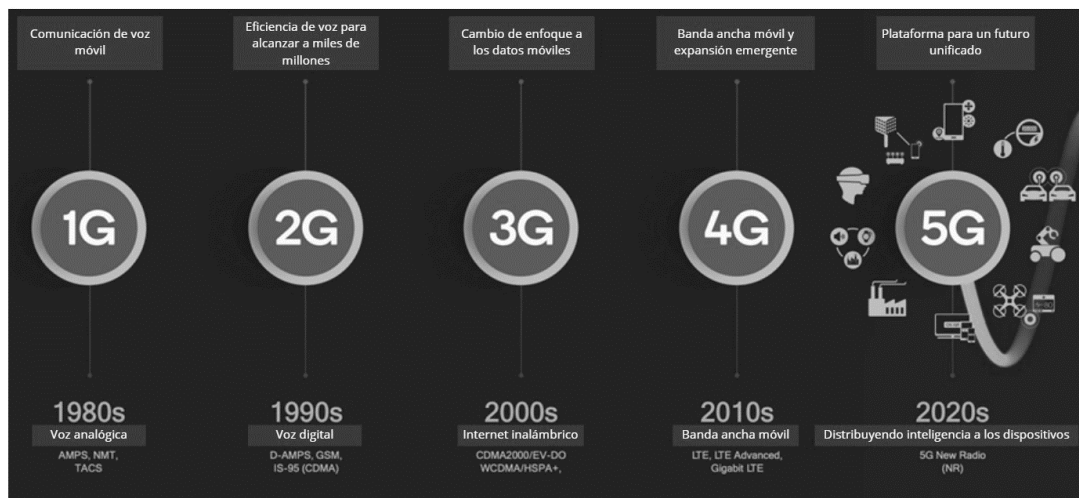
Como estipula Dahlman *et al.* (2011), el estándar GSM fue basado en el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y destinado a servicios con ancho de banda bajo como voz. Con la segunda generación de comunicaciones digitales móviles comenzó la oportunidad de proveer servicios de datos.

El 4G o cuarta generación de las tecnologías de telefonía móvil, según Pérez (2010), es un conjunto de tecnologías y protocolos basadas en IP con velocidades de acceso entre 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo, permitiendo seguridad y bajo coste. Mientras que la cobertura de la red 5G, como indica Smee & Qualcomm Technologies (2019) tanto en sub-6 GHz como en

ondas milimétricas seguirá creciendo, gracias a que el nuevo espectro 5G está disponible a través de subastas y uso compartido dinámico de espectro (DSS).

El siguiente gráfico muestra una línea de tiempo en donde se observa cada generación de red móvil y sus principales características.

Figura 16. **Generaciones de los sistemas de comunicación móviles**



Fuente: Thompson y Qualcomm Technologies, Inc. (2019). *Mobile has made a leap every ~10 years. The future of 5G*. Consultado el 12 de julio de 2022. Recuperado de <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/2019-future-of-5g-presentation.pdf>.

2.2.4.5. Base de datos en tiempo real (RTDBS)

Luego de que el bróker publique en el cliente web los datos enviados por la sonda de pH mediante MQTT, se busca que estos se almacenen en una base de datos para su procesamiento y posterior análisis. Existen muchos esquemas para poder realizarlo, así como muchas plataformas en la nube que permiten el almacenamiento de forma gratuita de dichas bases de datos.

Las bases de datos más comunes, como plantea Nicolas y Lucie (2018) son “SQL, NoSQL y bases de datos en la nube. A diferencia de una base de datos común que generalmente está organizada en tablas, este tipo de bases de datos sin tablas predefinidas son llamadas *schema-free*” (p. 7).

El procesamiento en tiempo real es un sistema que está sujeto a restricciones en tiempo real, lo cual conlleva a que, según Martin (1965), “sean capaces de controlar un entorno recibiendo datos, procesándolos y devolviendo los resultados lo suficientemente rápido como para afectar el entorno en ese momento” (p. 55).

Las diferencias entre una base de datos en tiempo real y una tradicional según Nicolas y Lucie (2017), son “sus objetivos de rendimiento, limitaciones de tiempo en microsegundos o incluso en nanosegundos, y su capacidad para evaluar el promedio de las transacciones perdidas y el costo incurrido por la pérdida de estas transacciones” (p. 1).

Al igual que las bases de datos convencionales, las que se dan en tiempo real tienen se rigen por las características ACID:

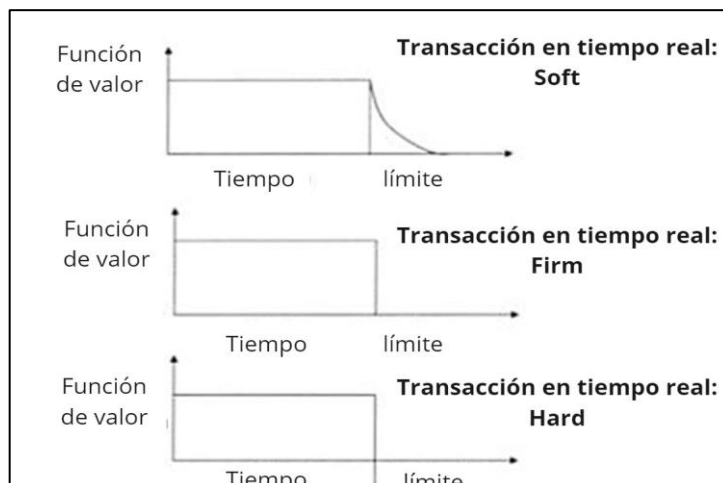
- Atomicidad: las transacciones siempre son completas.
- Consistencia: las transacciones se ejecutan en un orden específico determinado; se realiza solo lo que se puede concluir.
- Aislamiento: las transacciones no pueden ver ni afectar las acciones de otra transacción mientras aún no esté asignada.

- Durabilidad: una vez comprometida, una transacción no puede ser modificada o eliminada, aunque falle el sistema.

Las bases de datos en tiempo real son adecuadas cuando se requiere tener un buen panorama del estado de un entorno determinado. Las RTDBS tienen restricciones de tiempo y utilizan fechas límites para determinar la precisión del valor medido. Estas restricciones de tiempo, según Nicolas y Lucie (2017) son:

- *Hard*: la transacción debe completarse antes de la fecha límite.
- *Firm*: si la transacción no se completa antes de la fecha límite, entonces es abortado.
- *Soft*: la importancia de la información disminuye si se completa después de la fecha límite; la transacción continúa hasta que se complete.

Figura 17. **Tiempo de vida de las transacciones representado como funciones de valor**



Fuente: Nicolas y Lucie (2018). *Deadlines represented with value functions*. Consultado el 3 de agosto de 2022. Recuperado de https://ftp.utcluj.ro/pub/users/civan/IBD/3_EVALUARE/1_Referat/Resurse/B_2017_firebase.pdf.

Adicional a las restricciones de tiempo, una transacción se especifica por la implicación de la falta de fecha límite, periodicidad, patrón de acceso a datos y tiempo de ejecución.

Nicolas y Lucie (2018) también distinguen la diferencia entre los datos estáticos de una base de datos tradicional y los datos en tiempo real de una RTDBS, ya que las bases de datos tradicionales “tienen poca capacidad de respuesta y una falta de previsibilidad. Los datos nunca se vuelven obsoletos en una base de datos tradicional, lo que no es el caso en un sistema de base de datos en tiempo real” (p.36).

Según Nicolas y Lucie (2018) una base de datos en tiempo real se compone de dos elementos principales:

- Sistema de control: punto entre la computadora y su software.
- Sistema controlado: se trata del sistema observado cuyos datos son guardados en la base de datos. El estado real del entorno y el estado del entorno en la base de datos debe tener un alto grado de precisión.

Para la administración de una base de datos en tiempo real, existen en el medio distintos programas como CouchDB, MariaDB, RethinkDB y Firebase.

2.2.4.5.1. *Firebase*

Firebase es una plataforma de *back-end* desarrollada por Google para crear aplicaciones web y móviles nativas multiplataforma, con SDK Android, iOS y JavaScript. Como indica Tutorials Point (2017) “ofrece bases de datos en tiempo real, APIs, múltiples tipos de autenticación de usuarios y una plataforma de

alojamiento de datos estáticos, con la posibilidad de conectar Firebase a un *backend* existente utilizando bibliotecas del lado del servidor o con la API REST” (p. 4),

Tutorials Point (2017) propone también que, para su implementación, de preferencia se requiera de algunos conocimientos de JavaScript, pero no es necesario conocer alguna plataforma *backend* con anterioridad.

Este RTDBS es un sistema comercial de alojamiento de datos en la nube, *schema-free* y utiliza el mecanismo de almacenamiento NoSQL que significa *not only SQL*, lo cual lo hace escalable y con mayor rendimiento que las BD tradicionales. Entre las características que Tutorials Point destaca de Firebase se encuentran los siguientes:

- Base de datos en tiempo real: admite datos JSON y todos los usuarios conectados reciben actualizaciones en vivo después de cada cambio.
- Autenticación: se pueden usar anónimos, contraseñas o diferentes autenticaciones sociales.
- Alojamiento: las aplicaciones se pueden implementar a través de una conexión segura a los servidores *Firebase*.

Ventajas de *Firebase*:

- Es simple y fácil de usar, no necesita configuración complicada.
- Los datos son en tiempo real, por lo tanto cada cambio se actualizará automáticamente a los clientes conectados.
- Panel de control simple.
- Son varios los servicios útiles a elegir.

Aunque *Firebase* es un sistema de base de datos comercial, está disponible una licencia gratuita. Una de las limitaciones que tiene es que el uso del plan gratuito está limitado a 50 conexiones y 100 MB de almacenamiento.

2.2.5. Sensores de potencial de hidrógeno (pH)

La medida de pH es esencial en muchas industrias y su monitoreo se relaciona con la calidad de los productos y sus reacciones químicas. En el mercado existen diversas tecnologías, fabricantes y precios, los cuales difieren según la calidad de los materiales y la aplicación en la que se utilizará el sensor. En general un equipo de medición de pH completo consta del elemento sensor (electrodo de pH), un conector, un cable y un transmisor.

2.2.5.1. Tipos de sensores

La elección de un determinado sensor depende de la aplicación y las condiciones a las que será expuesto. Las aplicaciones pueden ir desde aguas residuales y mezclas químicas, hasta agua ultra pura en centrales eléctricas o laboratorios. Endress+Hauser (2015), fabricante de equipo de instrumentación, señala que la vida útil de un electrodo de pH depende de estas condiciones de su uso, pero también de la limpieza, calibración, intervalos de regeneración y la elección correcta del tipo de sensor.

2.2.5.1.1. Sensor de vidrio

En una publicación de Endress+Hauser (2015) señala que el elemento sensor de pH del electrodo de vidrio estándar es una capa de gel en el bulbo de vidrio. La medición se realiza por medio de la comparación entre un cambio del potencial electrostático a través del bulbo de vidrio, en relación con un elemento

de referencia que está en contacto con el medio por el diafragma, para crear un circuito eléctrico cerrado.

También se plantea que “existen diferentes tipos de sensores de vidrio, como versiones higiénicas y no higiénicas. Estos difieren en el tipo de diafragma utilizado (cerámica, Teflon® o ninguno) y en el tipo de gel o líquido utilizado para el sistema de referencia” (p. 43).

A continuación, se presentan los sensores Endress+Hauser de vidrio con diferentes tipos de diafragma:

Figura 18. **Sensores de vidrio con diferentes tipos de diafragma**

	Glass sensor Orbisint CPS11/CPS11D	Glass sensor Ceragel CPS71/CPS71D	Glass sensor Orbipore CPS91/CPS91D
			
pH range	0 to 14	0 to 14	0 to 14
Temperature range	32 to 275°F / 0 to 135°C	32 to 275°F / 0 to 135°C	32 to 230°F / 0 to 110°C
Max. pressure	Up to 232 psi / 16 bar (with B-glass)	Up to 188.5 psi / 13 bar	Up to 188.5 psi / 13 bar
Min. conductivity	50 µS/cm	10 µS/cm	500 µS/cm
Organic content	< 20 vol%	< 20 vol%	< 20 vol%
Shaft material	Glass	Glass	Glass
Diaphragm	PTFE	Ceramic	Open junction

Fuente: Endress+Hauser (2015). *pH measurement in industrial processes (Selection and engineering guide for your industry and application)*. Consultado el 23 de julio de 2022.

Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf.

Endress+Hauser (2015) describe que el elemento sensor de un sensor ISFET (*ion sensitive field effect transistor*) es un *chip* semiconductor sensible a los iones H⁺. Los sensores que no son de vidrio son irrompibles y los ISFET pueden tolerar cantidades más altas de solventes orgánicos que los sensores de vidrio. Los sensores tipo vidrio e ISFET utilizan los mismos tipos de referencia y diafragma. Este tipo de sensor es utilizado en procesos alimentarios o cuando hay altas cantidades (> 20 %) de disolventes orgánicos. Los sensores ISFET tienen un menor error alcalino y ácido en comparación con los sensores tipo vidrio. A continuación, se presentan los sensores Endress+Hauser ISFET con diferentes tipos de diafragma:

Figura 19. **Sensores ISFET con diferentes tipos de diafragma**

	ISFET sensor Tophit CPS471/CPS471D	ISFET sensor Tophit CPS491/CPS491D	ISFET sensor Tophit CPS441/CPS441D
			
Max. pressure	Up to 145 psi / 10 bar _{rel}	Up to 145 psi / 10 bar _{rel}	Up to 145 psi / 10 bar _{rel}
pH range	0 to 14	0 to 14	0 to 14
Temperature range	5 to 275°F / -15 to 135°C	5 to 230°F / -15 to 110°C	5 to 266°F / -15 to 130°C
Min. conductivity	10 µS/cm	500 µS/cm	0.1 µS/cm
Organic content	High level possible depending on application	High level possible depending on application	High level possible depending on application
Shaft material	PEEK, chip sealing: EPDM	PEEK, chip sealing: perfluorelastomer	PEEK, chip sealing: EPDM or perfluorelastomer
Diaphragm	Ceramic	Open junction	Ceramic

Fuente: Endress+Hauser (2015). *pH measurement in industrial processes (Selection and engineering guide for your industry and application)*. Consultado el 24 de julio de 2022.

Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf.

2.2.5.1.2. Sensor combinado

Sensorex (2018) asegura en su página web que la forma más común de medir parámetros de pH es utilizando un sensor electromecánico combinado, el cual cuenta con un electrodo de medición y otro de referencia. La función del electrodo de medición es detectar cambios en el valor de pH, mientras que el de referencia proporciona una señal estable que sirve para la comparación. Este electrodo de referencia lo constituye un cable de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) que se encuentra en una solución de cloruro de potasio (KCl).

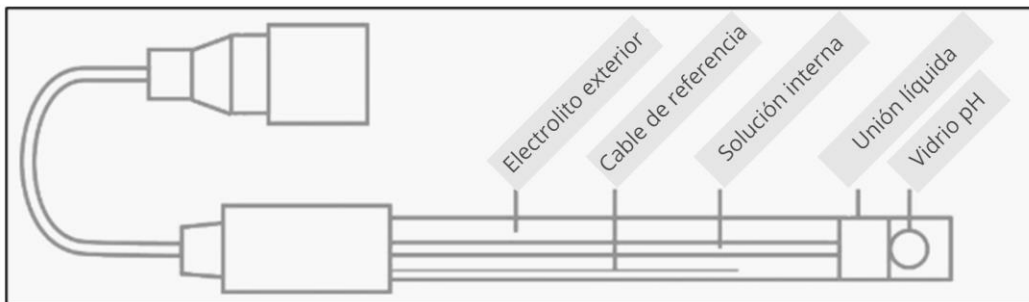
Cuando se usa un sensor combinado de pH, las señales en milivoltios del vidrio de pH y del electrodo de referencia se comparan para calcular el verdadero valor de pH de una solución. Estas señales son compatibles con un dispositivo de alta impedancia, conocido como medidor de pH, cuya función es mostrar la señal de milivoltios en unidades de pH.

La tecnología de sensores de pH combinados se puede utilizar para construir diferentes productos, como sensores de pH de laboratorio y sensores de pH industriales o de proceso. Los sensores de pH combinados fabricados de vidrio y plástico de 12 mm son conocidos comúnmente como sensores de estilo de laboratorio. Este tipo de sensores es el adecuado para aplicaciones de trabajo liviano como educación e investigación, muestreo ambiental y monitoreo de piscinas.

Por otro lado, Sensorex (s.f.) indica que los sensores de pH de proceso son adecuados para el monitoreo continuo del pH y generalmente se montan en una tubería, se sumergen en un tanque o se usan como parte de un conjunto de inserción. Los materiales con los que se fabrican son más resistentes y pueden incluir elementos de conexión hidráulicas estandarizadas (NTP).

A continuación, se presenta el esquema general de las partes de un sensor de pH pasivo:

Figura 20. **Partes de una sonda de pH (Sensorex)**



Fuente: Sensorex (s.f.). *Innovative solutions to simplify liquid analysis*. Consultado el 22 de julio de 2022. Recuperado de <https://sensorex.com/es/>.

Los sistemas hidropónicos normalmente incorporan sensores de pH y EC de estilo laboratorio, ya que tienen la ventaja de ser económicos y fáciles de usar. Los sensores con cuerpo de plástico son los preferidos para aplicaciones hidropónicas ya que son duraderos; así como los sensores de pH de unión única, los cuales también dan buenos resultados.

Un ejemplo de sensores combinados es, según Endress+Hauser (2015), “los que miden pH y el potencial de ORP (potencial de oxidación-reducción) para una visión general del proceso, adicional a que puede usarse para medir la impedancia de referencia para anticipar disminuciones en la calidad del sensor” (p. 10).

A continuación, se presentan los sensores Endress+Hauser combinados:

Figura 21. **Sensores combinados con diferentes tipos de diafragma**

Combined pH/ORP sensor Memosens CPS16D	Combined pH/ORP sensor Memosens CPS76D	Combined pH/ORP sensor Memosens CPS96D
		
Up to 232 psi / 16 bar _{rel} (with B glass)	Up to 188.5 psi / 13 bar _{rel}	Up to 188.5 psi / 13 bar _{rel}
pH: 0 to 14 ORP: -1500 to 1500 mV rH: 0 to 42	pH: 0 to 14 ORP: -1500 to 1500 mV rH: 0 to 42	pH: 0 to 14 ORP: -1500 to 1500 mV rH: 0 to 42
32 to 275°F / 0 to 135°C	32 to 284°F / 0 to 140°C	32 to 230°F / 0 to 110°C
50 µS/cm	10 µS/cm	500 µS/cm
< 20 vol%	< 20 vol%	< 20 vol%
Glass	Glass	Glass
PTFE	Ceramic	Open junction

Fuente: Endress+Hauser (2015). *pH measurement in industrial processes (selection and engineering guide for your industry and application)*. Consultado el 22 de julio de 2022.

Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf.

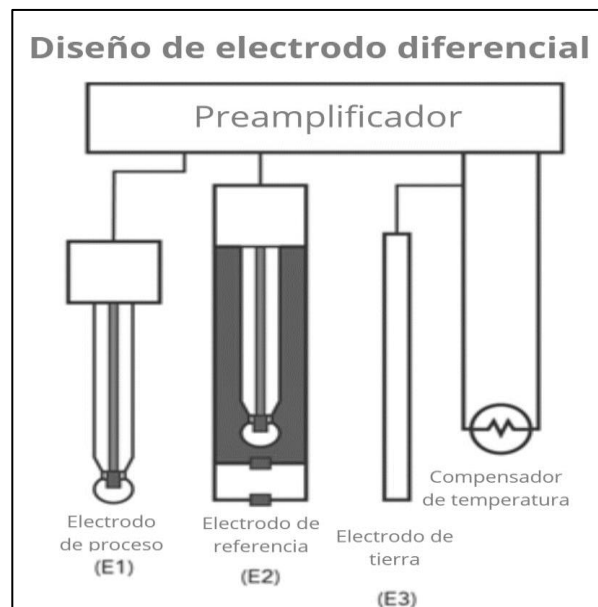
2.2.5.1.3. Sensor de pH diferencial

En comparación con una sonda de pH combinado que tienen 2 electrodos, los sensores de pH combinados cuentan con 3 electrodos. Según Sensorex (2018) “en el diseño diferencial, 2 electrodos miden el pH diferencialmente con

respecto a un tercer electrodo de tierra metálico. Este diseño tiene la ventaja de evitar las interferencias, lo que lo hace ideal para aplicaciones industriales como depuradores húmedos” (p. 67).

El electrodo de referencia que se encuentra en una celda (E2) que contiene una solución *buffer* o amortiguadora de pH 7.0 conocida, hace contacto eléctrico con el proceso mediante un puente salino de doble unión. El otro electrodo de pH de medición (E1) está en contacto directo con el proceso. Tanto el electrodo de proceso como el de referencia miden el pH de manera diferente respecto de un tercer electrodo de tierra metálico (E3).

Figura 22. **Esquema de un sensor de pH diferencial (Sensorex)**



Fuente: Sensorex. (s.f.). *pH Sensors for water and wastewater monitoring*. Consultado el 24 de julio de 2022. Recuperado de <https://sensorex.com/ph-sensors-3/>.

En comparación con los sensores de combinación convencional, los de pH diferencial proporcionan mediciones con mayor estabilidad durante períodos largos con menos tiempo de inactividad y mantenimiento.

Normalmente un medidor de parámetros de calidad de agua como pH/mV, conductividad/TDS, oxígeno disuelto, cloro y potencial de reducción de oxidación, se integra junto a un transmisor o controlador para adecuar las señales del sensor antes de registrar datos o programar el control del proceso.

2.2.5.1.4. Sensores de pH inteligentes

Un sensor inteligente, por lo tanto, incorpora algunas de las capacidades de procesamiento de señales y manipulación de datos de un transmisor o controlador, directamente en el sensor. Los módulos electrónicos de sensores inteligentes funcionan esencialmente como un microtransmisor, el cual elimina la necesidad del uso de instrumentación adicional. Por ejemplo, un sensor de pH inteligente con un protocolo analógico (4-20 mA) o digital (MODBUS) se puede conectar directamente a un sistema PLC o SCADA.

Entre las ventajas de utilizar sensores inteligentes está la de que pueden precalibrarse en cualquier sitio, eliminando la necesidad de calibrar en el campo. En lugar de llevar las soluciones de calibración y otros equipos al sitio, se pueden mantener en inventario los sensores precalibrados para estar listos con reemplazos rápidos cada vez que los clientes los necesiten. Adicionalmente, este tipo de sensores tiene una vida útil mayor y algunos no requieren algún tipo de mantenimiento.

2.2.6. Monitoreo de pH dentro de un sistema de cultivo hidropónico

En un sistema de cultivo hidropónico, según Sensorex (2018), generalmente, “poseen tres tanques de agua: agua limpia y fresca, agua enriquecida con nutrientes y pH controlado, y aguas residuales” (p. 1).

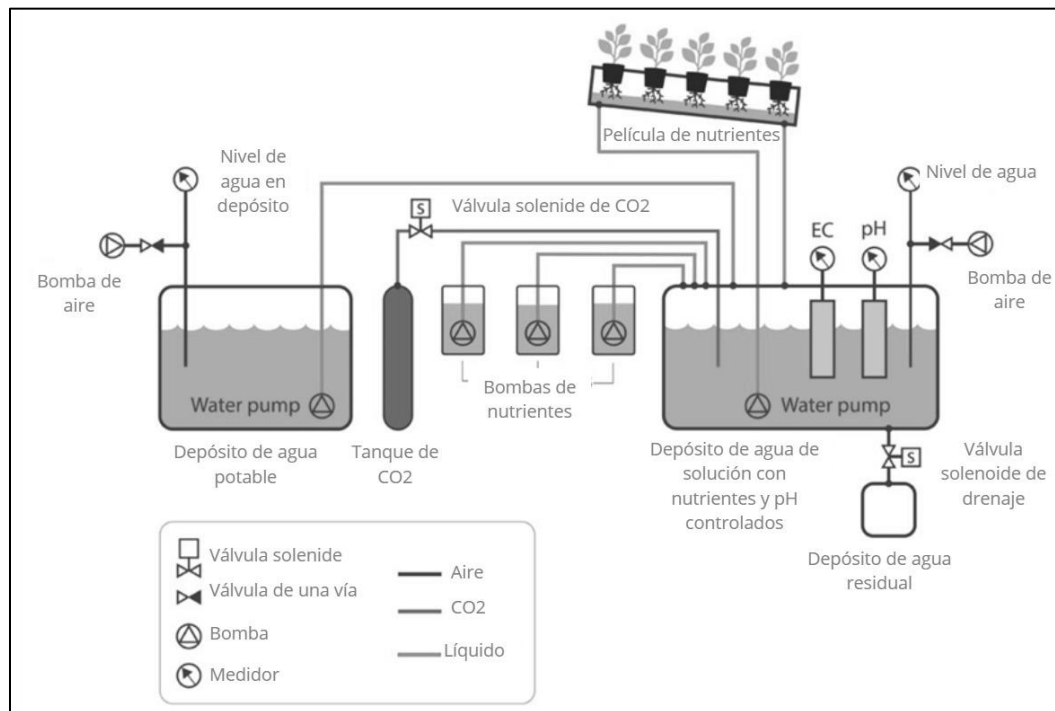
El agua enriquecida con nutrientes y el pH controlado comprende el medio de crecimiento para las plantas. El nivel de pH y la composición de nutrientes en este depósito de agua se controlan mediante válvulas y bombas para agregar nutrientes, dióxido de carbono o agua dulce.

El drenaje de las aguas residuales del depósito de agua enriquecido con nutrientes ayuda a mantener niveles constantes de agua, al mismo tiempo que ajusta la concentración de nutrientes y el pH.

Para configurar un sistema de monitoreo hidropónico se deben instalar sensores de conductividad y de pH en el depósito de la solución que se utilizará para suministrar el medio de crecimiento de las plantas. Según los datos de medición de los sensores, los controladores de pH y los controladores de conductividad, se realiza la apertura y cierre de las válvulas o el funcionamiento de las bombas, ya sea de forma manual o automatizada.

Un esquema general de control y monitoreo se presenta a continuación:

Figura 23. **Esquema de control y monitoreo de un sistema hidropónico (Sensorex)**



Fuente: Sensorex. (s.f.). *pH Sensors for water and wastewater monitoring*. Consultado el 24 de julio de 2022. Recuperado de <https://sensorex.com/ph-sensors-3/>.

En función de las lecturas proporcionadas por los sensores de pH y CE, se pueden establecer tres principales escenarios:

- Alta concentración de nutrientes y alta conductividad => agregar agua dulce.
- Baja concentración de nutrientes y baja conductividad => añadir nutrientes.
- Solución excesivamente alcalina y pH alto => agregar dióxido de carbono.

2.3. Calidad en la producción de hortalizas

Ordóñez (2002) destaca que la calidad juega un rol importante en la adaptación de procesos, productos y servicios a los constantes cambios de paradigma institucional, organizacional, tecnológico y comercial, que conlleva la globalización y búsqueda de ventajas competitivas focalizadas a las preferencias del cliente.

Morales (2009) define la calidad en las hortalizas como “todos aquellos atributos que determinan la preferencia de la fruta u hortaliza por parte del consumidor o cliente y que tienen relación con la aspectos físicos, características organolépticas y condición sanitaria de los productos” (p.109).

Viglizzo (2004) describe que, “debido a las exigencias del mercado internacional, la producción industrial y de servicios han sido sectores económicos pioneros en adaptar estándares, normas y protocolos que permiten unificar criterios de calidad y luego relacionarlos con el desarrollo sustentable” (p. 44).

2.3.1. Administración de la calidad en producción de alimentos

Como cualquier sistema de administración de la calidad, las buenas prácticas deben de ser consensuadas entre los entes involucrados, según Clemens y Marbán (2007) exponen en relación con términos, parámetros y tolerancias aceptadas para que “estas sean reconocidas de forma global sin importar el origen del producto” (p. 77).

El conjunto de estos parámetros acordados define una norma. Clemens y Marbán (2007) definen una norma como “un documento aprobado por una

entidad reconocida que proporciona, para uso común y repetido, reglas, guías o características para productos o procesos relacionados y métodos de producción, cuyo cumplimiento no es obligatorio” (p. 49).

Es importante diferenciar que el término norma se aplica a directrices cuyo cumplimiento es de carácter voluntario, mientras que las directrices de aplicación obligatoria se establecen en reglamentos técnicos. Las normas son constituidas por entidades y comités independientes internacionales; las normas técnicas son desarrolladas por entidades gubernamentales. Por ejemplo, en el sector alimenticio, las normas son elaboradas por los comités del *Codex Alimentarius*. Este fue establecido en 1963 por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La finalidad del *Codex Alimentarius*, según la FAO (1999) es “proteger la salud de los consumidores y asegurar la aplicación de prácticas productivas y de comercialización justas, así como desarrollar normas de alimentos, guías y textos relacionados” (p. 5).

El *Codex Alimentarius* reúne más de 200 normas alimentarias, difundidas internacionalmente y adoptadas de forma voluntaria. FAO (1999) subraya que estas normas y recomendaciones son para “el etiquetado de los alimentos, el empleo de aditivos, sustancias contaminantes, métodos de análisis y pruebas, higiene alimentaria, nutrición, importación de alimentos y sistemas de inspección y certificación en la exportación de alimentos, residuos de medicamentos veterinarios y de plaguicidas” (p. 3).

Entre los textos desarrollados por el programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias se encuentra el Código de Prácticas Internacionales Recomendadas para los principios generales de higiene de los alimentos.

En el Código CAC/RCP 1-1969 (1969) se expresa que para un control eficaz de la higiene: “todos, agricultores y cultivadores, fabricantes y elaboradores, manipuladores y consumidores de alimentos, tienen la responsabilidad de asegurarse de que los alimentos sean inocuos y aptos para el consumo” (p. 9).

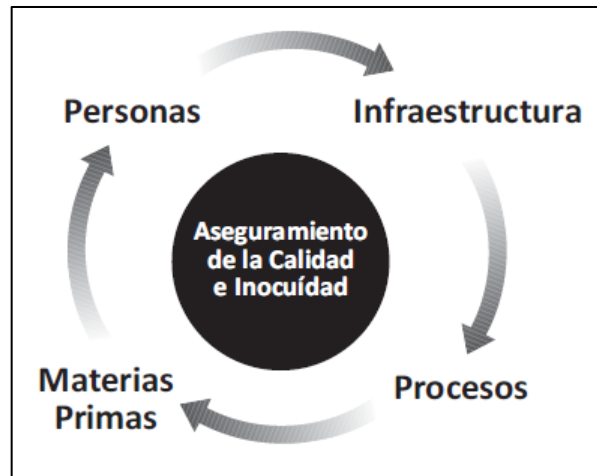
Por lo que, para lograr inocuidad en los alimentos, OMS (2005) indica que se deben adoptar controles descritos en el *Sistema de análisis de peligros y de puntos críticos de control (HACCP)*, “desde la producción primaria hasta el consumo final, resaltándose los controles de higiene básicos que se efectúan en cada etapa” (p. 66).

2.3.2. Gestión de aseguramiento de la calidad

Un sistema de aseguramiento de la calidad e inocuidad, como lo estipula ICA (2009) corresponde a “todas aquellas actividades coordinadas que buscan proporcionar confianza en que se cumplirán los requisitos de calidad e inocuidad de las frutas y hortalizas producidas” (p. 86).

Por lo tanto, para garantizar calidad e inocuidad en los alimentos y evitar peligros de causa biológica que puedan producir daños tanto a la salud como a la economía, es importante conocer la relación entre los siguientes conceptos:

Figura 24. **Conceptos para el aseguramiento de la calidad e inocuidad de un alimento**



Fuente: Morales (2009). *Buenas Prácticas Agrícolas. Aspectos relevantes en la producción de frambuesa (Rubus idaeus L.)*. Consultado el 4 de agosto de 2022. Recuperado de http://www.lafranqueraweb.com.ar/web/archivos/menu/Aspectos_de_su_produccion.pdf

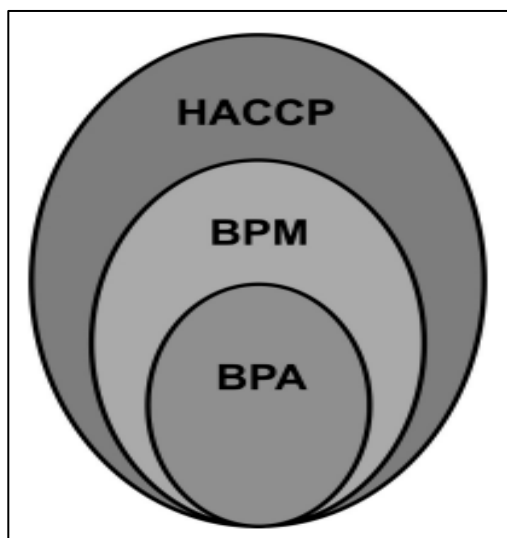
Morales (2009) también puntualiza que “un sistema para el aseguramiento de la calidad e inocuidad debe considerar una adecuada gestión tanto de los recursos humanos como de los procesos de trabajo desarrollados en pro de los objetivos de calidad e inocuidad del alimento” (p. 45).

Para lograr estos objetivos se recomienda aplicar los sistemas de aseguramiento indicados por la ANMAT (2008), entidad argentina que administra los medicamentos, alimentos y tecnología médica y que resalta la importancia de la relación entre las BPA y las buenas prácticas de manufactura (BPM), ambas prerrequisitos del sistema HACCP, y que son herramientas para: “la obtención de productos inocuos para el consumo humano, que incluyen tanto la higiene y manipulación como el correcto diseño y funcionamiento de los establecimientos,

y abarcan también los aspectos referidos a la documentación y registro de las mismas” (p. 3).

Esta interacción se puede visualizar de una mejor manera en el siguiente gráfico:

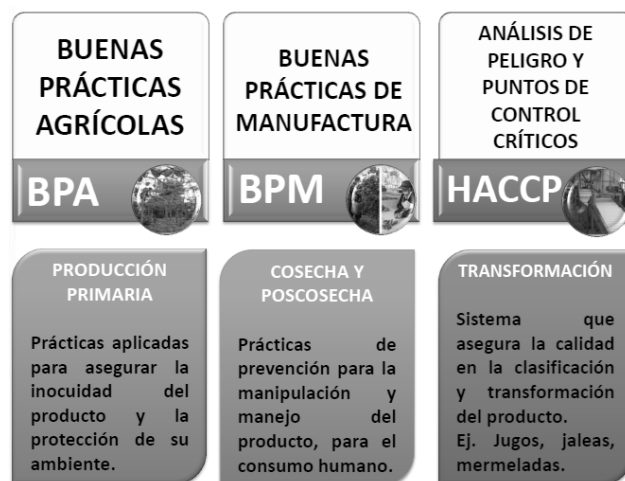
Figura 25. **Interacción entre BPA, BPM y HACCP**



Fuente: ANMAT (s.f.). *Buenas prácticas aplicadas a los alimentos*. Consultado el 3 de agosto de 2022. Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/portafolio_educativo/pdf/cap4.pdf

En la cartilla ICA (2009) se detalla que “la aplicación de las BPA, BPM y HACCP son parte de un sistema de aseguramiento de la calidad en las distintas etapas de producción de frutas y hortalizas” (p.26).

Figura 26. **BPA como parte de un sistema de aseguramiento de la calidad**



Fuente: Oficina de Gestión Integral y Mejoramiento Continuo (2009). *Sistemas de aseguramiento. CORPOICA Buenas Prácticas Agrícolas*. Consultado el 3 de agosto de 2022. Recuperado de <https://es.slideshare.net/roquefelixquinteroparra/bpa-corpoica> diapositiva 9

Algunas de las recomendaciones de BPA aplicadas en la etapa de producción primaria, como indica ANMAT (s.f.) “comprende la selección y adecuación de las áreas de producción, así como el control de contaminantes, plagas y enfermedades de las plantas” (p. 12).

Jaramillo *et al.* (2007) también resaltan que las BPA pueden incorporar el manejo integrado de plagas (MIP) y del cultivo (MIC) con el fin de ofrecer un producto de elevada calidad e inocuidad con un mínimo impacto ambiental, con bienestar y seguridad para el consumidor y los trabajadores, de modo que proporcionen un marco de agricultura sustentable, documentado y evaluable.

Las BPM son procedimientos que según ANMAT (s.f.) “permiten diseñar adecuadamente la planta y las instalaciones, realizar en forma eficaz los

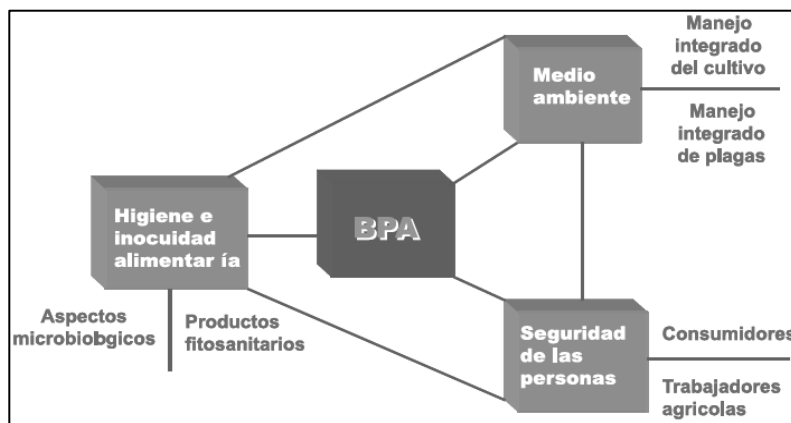
procesos y operaciones de elaboración, almacenamiento, transporte y distribución de alimentos” (p. 4).

2.3.2.1. Buenas prácticas agrícolas

La FAO (s.f.) hace referencia a las buenas prácticas agrícolas (BPA) como: “las mejores prácticas utilizadas en la producción agrícola a fin de garantizar la calidad e inocuidad del producto final. En general, los productos son cultivos, alimentos básicos y alimentos de origen animal” (p.5).

Las BPA se enfocan en tres principios que remarca Jaramillo, *et. Al.* (2007) como “la obtención de productos sanos que no representen riesgos para la salud de los consumidores, la protección del medio ambiente y el bienestar de los agricultores” (p.105).

Figura 27. Principios básicos de BPA



Fuente: Jaramillo *et al.* (2007). *Manual Técnico: Buenas prácticas agrícolas en la producción de tomate bajo condiciones protegidas*. Consultado el 4 de agosto de 2022. Recuperado de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13469/43123_50544.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Para la implementación de un programa de BPA se deben considerar aspectos como los que enfatiza Jaramillo *et al.* (2007): “el medio ambiente, la sanidad e inocuidad de los productos, su trazabilidad por medio de registros, y la seguridad para los trabajadores y consumidores” (p.5).

Adicional, para una adecuada implementación de BPA se debe tomar en cuenta, “la viabilidad económica y social, aplicando el conocimiento disponible y haciendo uso sostenible de los recursos naturales involucrados en la producción de los productos agrícolas” (p.4).

2.3.2.2. Aplicación de BPA en la cadena de producción

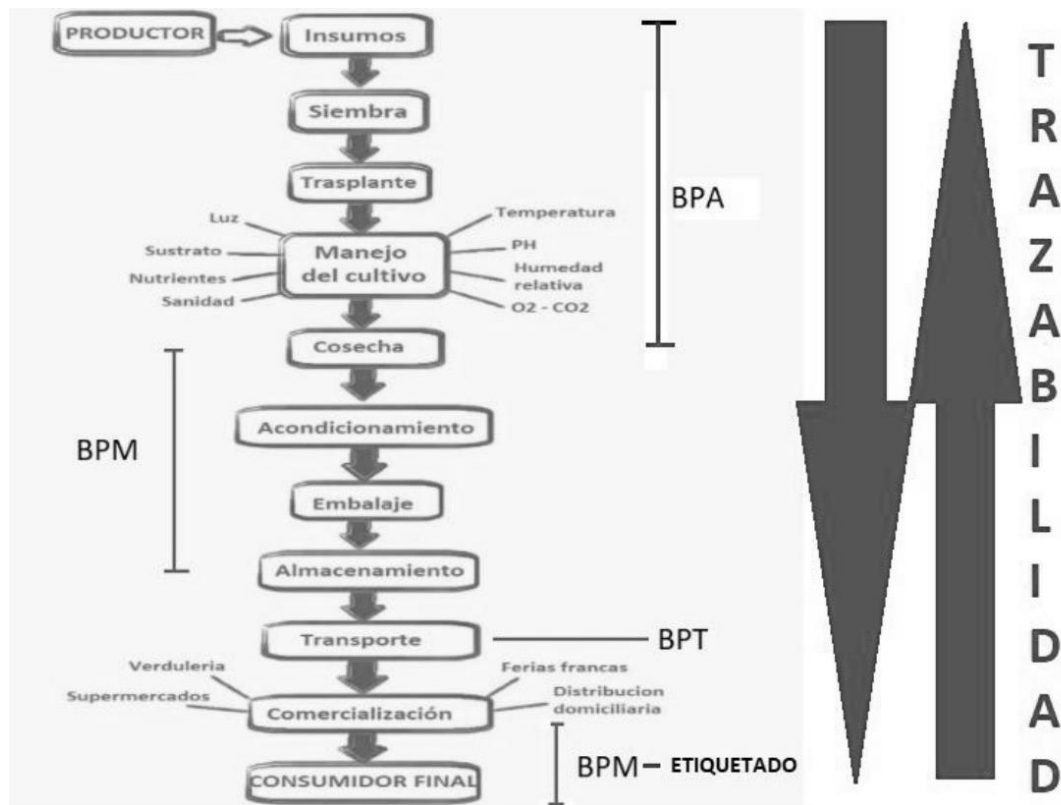
Para comprender de una mejor manera en qué etapa de la producción de cultivos hidropónicos son aplicadas las buenas prácticas agrícolas es importante definir lo que es una cadena de producción.

Ortiz (2009) afirma que una cadena de producción es “el conjunto de etapas por las que atraviesa un producto desde la producción primaria (preparación del terreno, selección de las semillas, siembra, aplicación de plaguicidas, cosecha, entre otros), pasando por el procesamiento, embalaje, hasta su venta al consumidor final” (p. 7).

En una cadena de producción de cultivos hidropónicos, las BPA son aplicadas directamente en la etapa primaria y son la puerta de entrada a un sistema integral de aseguramiento de calidad con opción a certificación. La etapa primaria que involucra las BPA va desde la gestión de los insumos hasta la cosecha, tal como lo indica Carranza *et al.* (2019) quienes realizaron el análisis

desde el punto de vista de un sistema de producción de lechuga hidropónica identificando los siguientes eslabones:

Figura 28. Cadena de producción de lechuga hidropónica



Fuente: Carranza et al. (2019). *Hidroponía en lechuga: Aplicación de BPA y BPM para la obtención de un producto de calidad*. Consultado el 3 de agosto de 2022. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/18920/Carranza%2c%20T.%2c%20Scattolini%2c%20A.%2c%20Vexenat%2c%20L.%20-%20Hidropon%3%ada%20en%20lechuga%20aplicaci%3%b3n%20de%20BPA%20y%20BPM%20para%20la%20obteni%3%b3n%20de%20un%20product~1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

2.3.2.3. Ventajas de implementar BPA

Algunas de las ventajas que se obtienen al implementar BPA en la producción de cultivos hidropónicos urbanos según Ortiz (2009) son “protección de la salud de la familia y de los trabajadores, mejora de los productos y la forma en que se procesan, y mejora de las oportunidades y precios” (p. 9).

Estas mejoras impactan en ahorro de recursos e insumos, lo cual reduce costos y aumenta la posibilidad de vender productos diferenciados, tanto en el mercado existente como en nuevos mercados.

Adicional a estas ventajas, Jaramillo *et al.* (2007) aportan otras mejoras que se logran en los productos como las condiciones higiénicas, “previene y minimiza el rechazo, reduce las fuentes de contaminación y mejora la imagen del producto y de la empresa ante sus compradores” (p. 5).

Otro aspecto importante desde el punto de vista social es que las BPA permiten inclusión en los mercados; además, constituyen una excelente oportunidad para demostrarse a sí mismas y a otras comunidades que se pueden integrar con éxito, al tiempo que mejoran su calidad de vida y autoestima, sin dejar de lado sus valores culturales.

En general, como señala Morales (2009) “las BPA permiten aumentar la productividad a mediano y largo plazo, ya que algunos de sus componentes mejoran el conocimiento y la gestión del sistema productivo” (p. 111).

2.3.2.4. Consideraciones para la implementación de la BPA

Para implementar un sistema de BPA dentro de la estructura de un proyecto nuevo o como parte de una reingeniería de los procesos de un sistema productivo existente, se deben considerar varios aspectos esenciales para garantizar la obtención de alimentos inocuos y de calidad.

Estos aspectos pueden involucrar y profundizar tantos ítems como el manual o autor desee. En su manual *Mis buenas prácticas agrícolas*, Ciro (2009) menciona que existen características en común como: “áreas e instalaciones, equipos, utensilios y herramientas; personal, compromisos del productor, manejo de suelos, material de propagación, nutrición de las plantas, protección de cultivos, documentación y manejo de registros, plan de manejo de residuos y asistencia técnica permanente” (p. 14).

Adicional, Brambilla *et al.*(2012) resaltan los siguientes aspectos que se deben tomar en cuenta y evaluar: “sitio de producción, agua y riego, abonos y fertilizantes, gestión de productos fitosanitarios, manejo del producto final; salud, seguridad y bienestar laboral y trazabilidad y registros” (p. 5).

Mientras, en la guía de buenas prácticas agrícolas para la producción de frutas y hortalizas frescas en Uruguay se tomaron en cuenta en el 2014 las siguientes consideraciones: “sistema productivo, cosecha, poscosecha; maquinaria, recipientes, utensilios y herramientas; manejo de los animales, personal, documentación de las operaciones, trazabilidad, planificación de la producción, buenas prácticas de cultivo, recolección y manipulación de producto, comercio de productos limpios” (p. 6).

En el manual de buenas prácticas agrícolas elaborado por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina (SENASA) (2010), también se resalta la capacitación permanente como aspecto a considerar.(p.14)

Los impactos clasificados por categoría, según Benke y Bruce (2017), pueden ser económicos, ambientales y sociales.

Con base en las resoluciones e indicaciones que dictan las Secretarías de Alimentos y Bioeconomía de Regulación y Gestión Sanitaria de Argentina, Carranza *et al.* (2019) señala que: la aplicación de las BPA contempla los siguientes 7 aspectos:

- “Documentación obligatoria y trazabilidad
- Productos fitosanitarios
- Agua
- Manipulación
- Animales
- Uso de fertilizantes orgánicos y enmiendas
- Responsable técnico” (p. 9).

Adicional a estas recomendaciones, tal como propone Fuentelsaz, *et al.* (2015), se deben considerar las siguientes medidas para la mitigación del cambio climático y disminución de los efectos de gases invernadero:

- Excluir el uso de plaguicidas y herbicidas de síntesis química, ahorrar el empleo de combustibles fósiles, además de emisiones, desde su fabricación hasta su aplicación.

- Fomentar los canales cortos de comercialización, evitar los transportes internacionales de largas distancias y, con ello, sus emisiones asociadas.
- Uso eficiente de la energía, como utilizar elementos de bajo consumo y fuentes de energía renovables.

2.3.3. Certificaciones en el comercio de hortalizas

Las empresas privadas, clientes o mercados específicos de comercialización como vendedores al por menor, se están convirtiendo en una fuerza de mercado a ser tomada en cuenta, ya que, como denotan Clemens y Marbán (2007), “pueden significar el cumplimiento de normas adicionales a las normas y reglamentos técnicos nacionales” (p. 6).

Para Guatemala, según datos de la OMC (2009) existe un gran número de productos frescos afectados por normas privadas, cuyo principal mercado de exportación es Estados Unidos, España, Francia y Reino Unido. Estas normas corresponden a GLOBALGAP, las cuales son impuestas por empresas exportadoras a los proveedores locales que en su mayoría son pequeños productores de hortalizas” (p. 2).

Luego de evaluar de forma general la situación de 22 países miembros de la OMC, se concreta que quienes imponen normas privadas en sus principales mercados de exportación son minoristas, supermercados e hipermercados como Marks and Spencer's, Metro, Primus Labs, Tesco y Walmart. Algunas certificaciones de buenas prácticas agrícolas son:

- EUREPGAP/GLOBALGAP (*Euro retailer produce working group*)
- TNC (Tesco)

- BRC (*British Retail Consortium*)
- SQF 1000 (*Safe Quality Food*)

2.3.4. Indicadores de gestión

Como plantea Benke y Bruce (2017), “los KPI pueden ser evaluaciones cuantitativas o cualitativas, basadas en modelos, análisis, revisión de la literatura y opinión de expertos. Además, se debe tomar en cuenta que cada KPI identificado como satisfecho, todavía se puede mejorar en el futuro” (p. 23).

Algunos KPIs en la producción de hortalizas son:

- Porcentaje de productividad incrementada
- Porcentaje de reducción en el costo del trabajo
- Porcentaje de reducción en la pérdida de producción
- Mayor calidad del producto

2.3.4.1. Fichas de autoevaluación

Las fichas de autoevaluación tienen como objetivo permitirle al productor conocer y analizar las condiciones en que se encuentra determinada etapa, proceso o área dentro del sistema productivo, y así encontrar el o los puntos que deben mejorar, con el objetivo de alcanzar el grado de calidad e inocuidad deseada.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis del sistema hidropónico NFT

Previo al desarrollo del sistema hidropónico se tomó un curso teórico-práctico de hidroponía con duración de 50 horas en la ciudad de Guatemala. De forma guiada se conoció y se pusieron en práctica los métodos hidropónicos de cultivo en sustrato sólido y en agua.

Para los métodos con sustrato sólido se implementaron mangas colgantes verticales de polietileno rellenas con fibra de coco, cascarilla de arroz y arena de río; la forma de riego fue goteo por gravedad con solución nutritiva. También se realizaron pruebas con cajas que tenían la misma combinación de sustratos sólidos de las mangas y cajas con solución nutritiva para el método de raíz flotante. Las fotografías donde se desarrollan las pruebas de estos métodos se muestran en apéndices 1 y 2.

Luego de conocer y evaluar estos métodos hidropónicos se procedió con la investigación y desarrollo de un sistema hidropónico con solución nutritiva recirculante (NFT), al cual también se le implementó un sistema para el monitoreo remoto de los niveles de pH en el agua de solución.

Durante la investigación se obtuvieron niveles aceptables de pH del agua de solución y cosechas con características físicas ideales para su consumo y comercialización.

El sistema hidropónico se desarrolló dentro de una estructura con área de 9 m², con techo, paredes laterales y frontales cubiertas con plástico blanco con aditivo antipolvo y antiniebla, protección UV y permisividad de luz del 67 % y difusión de luz del 60 %.

El sistema NFT se encuentra apoyado en una estructura metálica tipo A con 5 tubos PVC en cada lado. Cada tubo tiene 40 metros de largo y espacios para cultivos a cada 20 cm para un total de 200 cultivos.

Figura 29. **Implementación del sistema hidropónico NFT**



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

El sistema cuenta con un depósito para agua de solución con capacidad de 102 litros y dentro de este depósito una bomba sumergible de 1.3 HP que impulsa la solución a través de los tubos del sistema a frecuencia de 15 minutos cada

hora en horario de 7 a.m. a 7 p.m. y 15 minutos cada dos horas en horario de 9 p.m. a 5 a.m. Para la oxigenación de la solución se utiliza una bomba de aire con salida máxima de 1.6 L/min; esta bomba está programada para que realice la oxigenación dos veces al día por un tiempo de media hora.

La programación de los horarios de la bomba de aireación y de bombeo de la solución para la recirculación a través de los tubos se ejecuta con un temporizador digital de tipo programable con memoria de 20 eventos.

El tiempo total que se utilizó para la implementación de todo el sistema hidropónico NFT fue de cuatro semanas y el total de los costos implicados en su desarrollo se detalla en la siguiente tabla.

Tabla VII. **Costos de la implementación del sistema hidropónico**

No.	Tipo	Descripción	Inversión (Q)
1	Material	Componentes del sistema tecnológico: sensor de pH, <i>datalogger</i> , cables	4,000.00
2	Material	Estructura de sistema hidropónico NFT	2,500.00
3	Material	Insumos agrícolas	500.00
4	Técnico	Capacitación	625.00
5	Intelectual	Asesor de investigación	2,500.00
6	Intelectual	Investigador	7,000.00
7	Humano	Operador de huerto	1,000.00
8	Varios	Gasolina, alimentación, datos	1,000.00
Total			19,125.00

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Diagnóstico del cultivo

Se eligió lechuga de la variedad *Lactuca sativa* y *Lactuca inybacea*, Grand Rapid tipo Crespa como cultivo; esta variedad de lechuga tiene las hojas sueltas

y dispersas. Su disponibilidad en el mercado de hortalizas y su fácil adaptación al sistema hidropónico fue el motivo de la elección de esta variedad.

El sistema de siembra utilizado es por trasplante y el método de cultivo hidropónico es de tipo raíz flotante, ya que no se utiliza ningún sustrato sólido luego del trasplante.

Figura 30. Plántulas de lechuga crespa listas para el trasplante al sistema hidropónico NFT



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

Las plántulas de lechuga con aproximadamente 2 semanas de siembra se adquirieron con un agricultor local, quien realiza el semillero de la germinación en

sustrato orgánico y es el encargado de los cuidados en esta etapa de desarrollo de los cultivos. El peso promedio por lechuga sin raíz, durante las dos cosechas anteriores al implementar el sistema de monitoreo remoto es de 124 gramos.

El proyecto de monitoreo remoto de los niveles de pH en la solución se desarrolló en la etapa primaria de la cadena productiva durante dos períodos de cosechas, luego del trasplante de las plántulas de lechuga hasta la cosecha, períodos que duraron 26 días y 27 días, respectivamente.

Figura 31. **Cultivo en fase de desarrollo**



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

La solución nutritiva A y B que se utiliza es comercializada por el INCAP; las proporciones utilizadas en la solución son 5 cc de la solución A y 2 cc de la B por cada litro de agua.

Entre cada cosecha se realizaron procedimientos que dictan las BPA para la limpieza y desinfección del sistema NFT que incluyó los siguientes pasos:

- Se retiró la masa de la raíz y las esponjas, de los *nets pots*.
- Se vació la solución nutritiva restante en la base de algunos arbustos o árboles.
- Se lavó la tubería, y los *nets pots* con agua y jabón, luego se le aplicó cloro para garantizar la desinfección de todos los elementos del sistema NFT.

3.1.2. Diagnóstico de la medición de pH en agua de solución

La forma en que se monitorean los niveles de pH del agua de solución de un sistema hidropónico tradicional es manual por medio de una cinta de pH, la cual es una cinta reactiva que permite determinar el nivel de pH ácidos y básicos en un rango de 0 a 13, en escala de 1. Los pH ácidos marcan tonalidades amarillas y los pH alcalinos o básicos tienen tonalidades verdosas. El rollo de esta cinta mide aproximadamente 4.5 metros y aproximadamente 100 mediciones.

Para determinar el valor de pH con la cinta se debe mojar aproximadamente 1 cm de cinta con el líquido que se va a medir, esperar entre 10 a 15 segundos el cambio de tonalidad y luego comparar el color de la tira mojada con el color de la escala adjunta al empaque de la cinta.

La deficiencia encontrada en el uso de este método de medición de pH del agua de solución de cultivos hidropónicos es la resolución de la medición y susceptibilidad al error humano debido a la interpretación de las distintas tonalidades de la cinta.

Las tiras de pH funcionan de forma semicuantitativa, ya que muestran valores aproximados del valor de pH y son menos precisas que un pHmetro digital, eso no quiere decir que no sean exactas en su medida, de hecho, si se sigue el protocolo pueden proporcionar resultados muy buenos. Las tiras reactivas de pH son de bajo costo comparado con otros métodos, y son muy útiles para determinar rápidamente el estado de una solución, pero no son adecuadas para mediciones precisas.

Figura 32. **Tira reactiva de pH**



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

Otro método común para determinar los niveles de pH en agua de solución es el uso de medidores de pH digitales portátiles; estos varían de características y precio en el mercado. Se encuentran con una escala de medida entre 0 a 14.0 y 16.0 pH, resolución de 0.1 a 0.01 pH, exactitud en la medición de pH de ± 0.5 a ± 0.05 pH. Por lo general estos medidores también permiten medición de otras

variables como conductividad. También requieren de protocolos de limpieza luego de cada medición y antes de su almacenamiento, así como el uso de soluciones para la calibración.

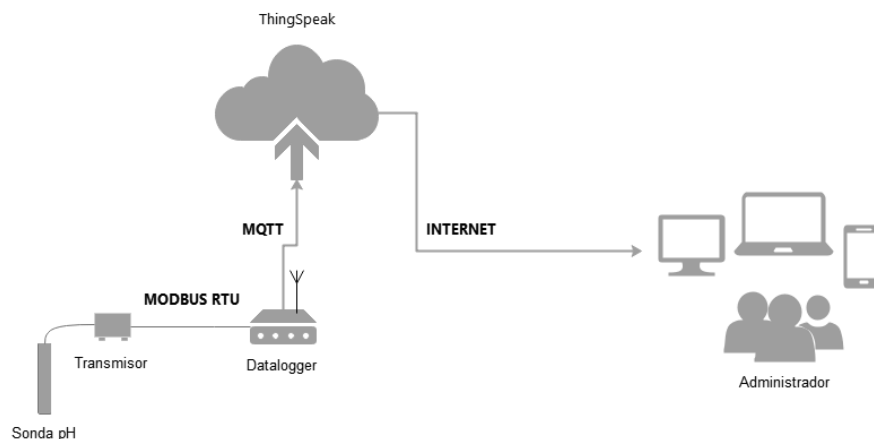
La principal deficiencia con estos equipos de medición digital es que en su mayoría no cuentan con una memoria capaz de almacenar los valores medidores y requieren de la intervención humana constante para realizar las mediciones y llevar su registro. Adicional, pueden llegar a tener altos costos según sus características de medición y tecnología utilizada en su fabricación.

3.2. Análisis y diseño del sistema de monitoreo remoto

Para los períodos de cultivo 3 y 4 se desarrolló un sistema de monitoreo remoto de la variable de pH del agua de solución del sistema hidropónico NFT, descrito anteriormente. El sistema de monitoreo se implementó con un sensor de pH que consta de una sonda con transmisor RS485, un *datalogger* 4G LTE con entradas analógicas y la plataforma de visualización de las lecturas de pH en la nube. La precisión del sensor es de ± 0.1 pH, con un rango de medición de 0-14 pH y resolución de 0.01 pH.

El protocolo de comunicación entre el sensor de pH y el *datalogger* es Modbus RTU con una conexión analógica RS485. La comunicación entre el *datalogger* y la plataforma de visualización de las lecturas en la nube se realizó por medio del protocolo MQTT a través de la red celular 4G. El acceso para la visualización y descarga de datos se realizó por medio de una conexión de internet.

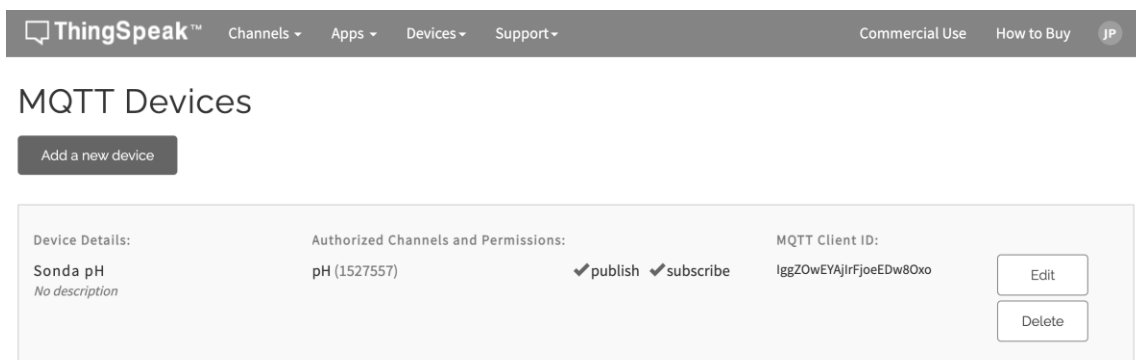
Figura 33. Diagrama del sistema de monitoreo remoto de pH



Fuente: elaboración propia, utilizando el sistema Smartdraw.

Se procedió a crear en *Thingspeak* la cuenta de usuario y el dispositivo MQTT que enviará las actualizaciones al *field1* (pH) usando la dirección de bróker *mqtt3.thingspeak.com* y el puerto 1883:

Figura 34. Configuración de dispositivo MQTT en Thingspeak



Fuente: captura de pantalla del software online Thingspeak .

Al crear el dispositivo, *Thingspeak* genera las credenciales de identificador, usuario y *password* para que el mismo pueda suscribirse y publicar en el *field1*; estos datos se configuraron en el *dataloger* para que se estableciera la conexión:

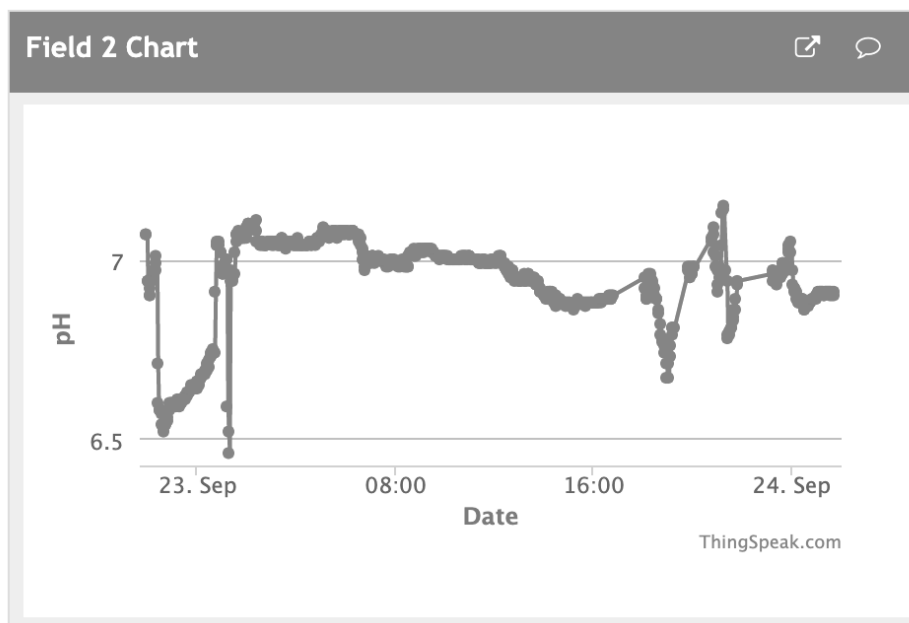
Figura 35. **Configuración del dataloger con las credenciales MQTT de Thingspeak**

The screenshot shows the 'MQTT Subscriber' configuration page in the Thingspeak web interface. The page has a top navigation bar with tabs: Analog inputs, Analog outputs, Discrete inputs, Discrete outputs, Communication, Archives, Limits verification, Alerts, Time parameters, and Start. Below this is a sub-navigation bar with tabs: Ethernet, 3G/GPRS/GSM, UART, Virtual interfaces, Connected devices, Modbus devices, Modbus register grouping, Data transfer, FTP server, MQTT Subscriber, and Routing. The 'MQTT Subscriber' tab is selected. The configuration form includes: an 'Enabled' checkbox checked; a 'Transmission channel' dropdown set to 'GPRS'; 'MQTT Broker URL' set to 'mqtt3.thingspeak.com'; 'MQTT Broker Port' set to '1883'; 'Subscriber Identifier' set to 'lggZOwEYAjlrFjoeEDw8Oxo'; 'User Name' set to 'lggZOwEYAjlrFjoeEDw8Oxo'; 'User Password' set to 'd0yjlXNoxx357hwQzPqVMIWR'; and 'Session keep alive' set to '60' seconds.

Fuente: captura de pantalla del software online Thingspeak.

La sonda de pH se instaló en el depósito de solución de nutrientes, y se configuró la interrogación de los valores de pH a cada hora, por 28 días para un total de 672 lecturas. Las lecturas se visualizaron en la plataforma libre de *Thingspeak* y se pudo tener acceso en cualquier momento mediante una conexión de internet.

Figura 36. Gráfica de lecturas de pH en *Thinkspeak*



Fuente: captura de pantalla del software online Thingspeak .

Debido a que se utilizó una cuenta gratuita de *Thinkspeak* para la visualización y almacenamiento de las lecturas de pH, la plataforma permite únicamente almacenar las últimas 255 entradas, por lo que fue necesario descargar las lecturas tres veces durante el período de análisis y luego unir los datos en un solo archivo para visualizar el período completo de medición.

Se procedió a recopilar y analizar las características de los cultivos cosechados durante 4 cosechas consecutivas, de las cuales las dos primeras tuvieron un monitoreo del nivel de pH de forma manual con medidor digital a frecuencia de 1 vez por semana y las posteriores, dos cosechas bajo el sistema de monitoreo remoto a frecuencia de cada hora.

Entre cada cosecha se tuvo un intervalo de 5 a 6 días, tiempo en el que se procedió a limpiar y desinfectar las tuberías y depósito del sistema NFT. Los períodos de cada cosecha fueron las siguientes:

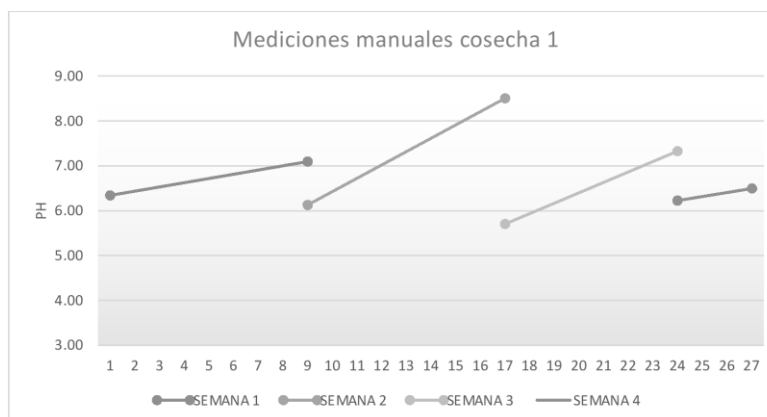
Tabla VIII. **Períodos de cosecha y su método de medición**

Período	Tipo de medición del pH	Fecha de trasplante	Fecha de cosecha	Días
I	Manual con medidor digital	5/1/2020	1/2/2020	27
II	Manual con medidor digital	6/2/2020	5/3/2020	28
III	Sistema remoto	9/3/2020	5/4/2020	27
IV	Sistema remoto	10/4/2020	6/5/2020	26
Total				108

Fuente: elaboración propia.

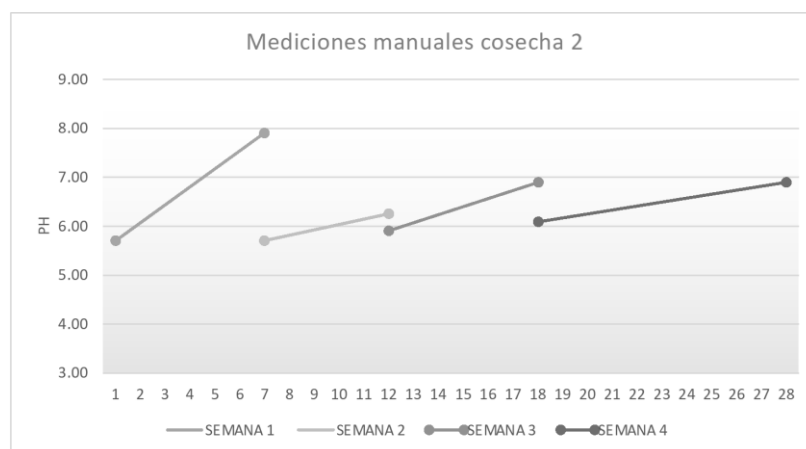
El resultado de las lecturas tomadas en los períodos de cultivo I y II se presenta en el siguiente cuadro:

Figura 37. **Lecturas de pH registradas de forma manual con medidor digital durante el desarrollo de los cultivos en el período I**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Figura 38. **Lecturas de pH registradas de forma manual con medidor digital durante el desarrollo de los cultivos en el período II**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Con base en las lecturas tomadas de forma manual con medidor digital de pH se presentan las características principales en el siguiente cuadro:

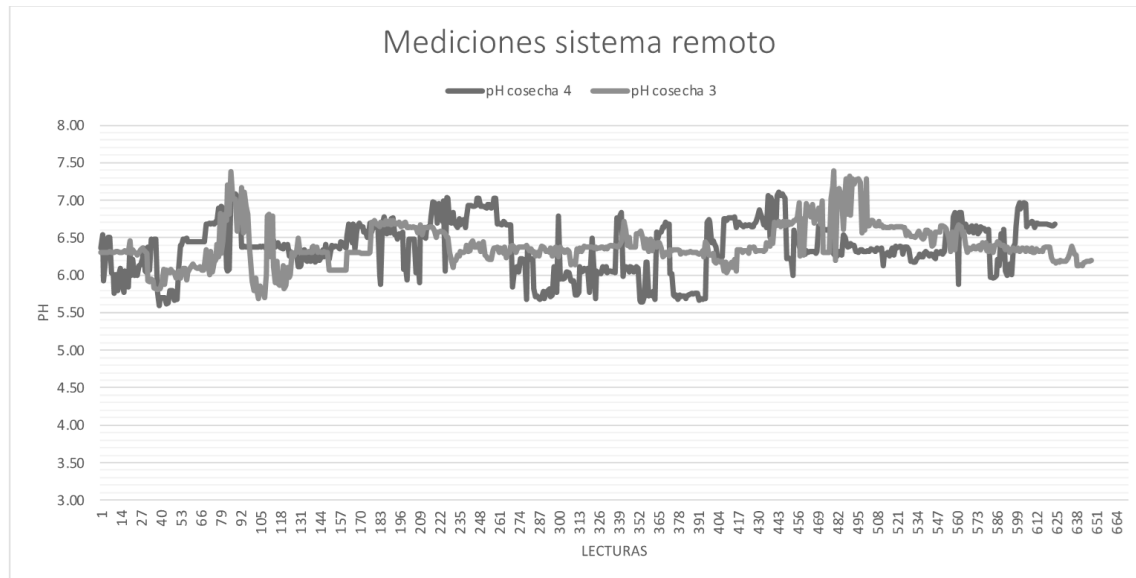
Tabla IX. **Resumen de lecturas de pH medidas de forma manual**

Período	No. de lecturas	pH promedio	pH máximo	pH mínimo
I	8	6.71	8.5	5.6
II	8	6.42	7.9	5.7

Fuente: elaboración propia.

El resultado de las lecturas tomadas en los períodos de cultivo III y IV se presentan a continuación:

Figura 39. Lecturas de pH registradas de forma remota durante el desarrollo de los cultivos en los periodos III y IV



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Tabla X. Resumen de lecturas de pH medidas de forma remota

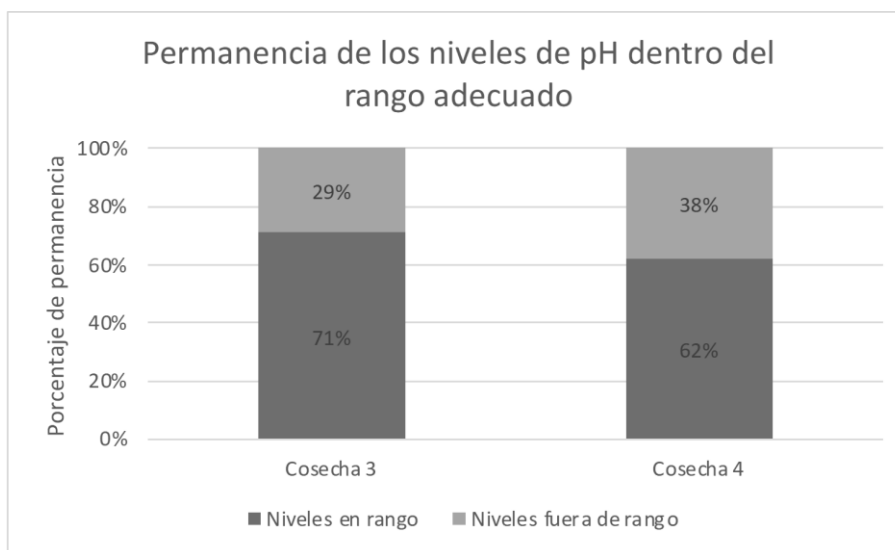
Período	No. de lecturas	pH promedio	pH máximo	pH mínimo
III	648	6.40	7.39	5.69
IV	624	6.37	7.11	5.59

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en el gráfico 39 que los niveles de pH bajo un sistema de monitoreo remoto se controlaron de mejor forma y se mantuvieron dentro del rango adecuado ligeramente ácido de 5.5 y 6.5, en comparación con las lecturas realizadas manualmente que presentaron máximos de 8.5 y 7.9.

La tasa de permanencia del nivel de pH dentro del rango adecuado se presenta en el siguiente gráfico.

Figura 40. **Tasa de permanencia de los niveles de pH en un rango de 5.8 y 6.5**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Se puede observar en la gráfica de la figura 40 que el porcentaje de permanencia de los niveles de pH en el agua de solución, en promedio se mantuvo en un 67 %, que representa un 28 % menos del resultado esperado (entre 95 % y 100 %).

Durante el desarrollo de los cultivos en los cuatro períodos de cosecha, el nivel de pH de la solución se elevó por arriba del nivel adecuado en varias ocasiones, por lo que fue necesaria la aplicación de ácidos o bases diluidas para ajustar el pH de la solución nutritiva.

3.3. Riesgos de contaminación que puedan afectar la calidad e inocuidad en los cultivos hidropónicos

Debido a que las plántulas de lechuga son adquiridas a un proveedor, las etapas de insumos y siembra no forman parte del proceso productivo de lechuga para el huerto hidropónico bajo estudio.

Los tipos de riesgos de contaminación identificados en las etapas de trasplante, manejo de cultivo y cosecha se presentan a continuación:

Tabla XI. **Riesgos de contaminación en el proceso productivo de lechuga hidropónica**

Etapas del proceso	Riesgo de contaminación	Probabilidad	Impacto	BPA
Trasplante	Biológico	40	A	Seleccionar plantas sanas y libres de enfermedades para sembrar. No permitir el paso de animales dentro del huerto. Utilizar sustratos esterilizados, libres de suelo. Instalar protecciones agrícolas para evitar el ataque de plagas durante el proceso. Utilizar agua proveniente de fuentes limpias. Utilizar un sistema de monitoreo remoto y control de las variables del sistema.
Manejo del cultivo	Biológico	40	A	No tener depósitos de basura cerca del huerto Disponer de servicios sanitarios y áreas de lavado para el operador del huerto. Los servicios sanitarios deberán de estar alejados o en una planta distinta al huerto. Se debe realizar limpieza periódica del contenedor del agua de solución y sus componentes y registrar cada higienización. El depósito de agua de solución debe contar con tapadera para evitar la contaminación.

Continuación de la tabla XI.

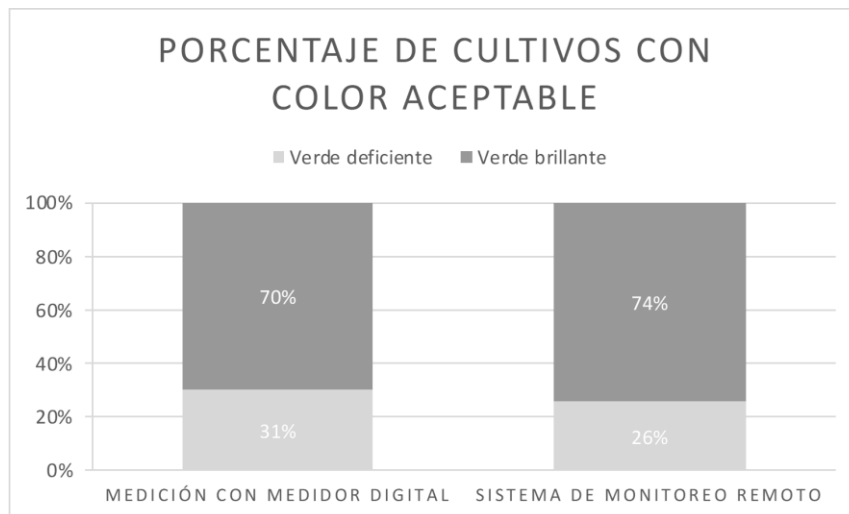
Cosecha	Físico	30	M	Evitar jugar cerca del huerto, así como el ingreso de niños y personas no autorizadas. No ingerir alimentos dentro del huerto. El operador del huerto debe mantener un correcto estado de su higiene personal (lavado de manos, uñas cortas y bien mantenidas). No utilizar aretes y pulseras dentro del invernadero.
	Químico	40	A	Se debe disponer de espacios cerrados y separados para almacenar productos químicos, insumos, herramientas, equipos de protección y cosechas. Cumplir con normas de seguridad en las bodegas y en el uso de químicos. Utilizar equipo de seguridad al momento de aplicar químicos al sistema. Seguir las recomendaciones de dosificación indicadas en el envase o etiqueta del producto agroquímico. Se debe contar con registro de cada aplicación indicando fecha, tratamiento, producto y dosis. No se debe aplicar plaguicidas por lo menos 8 días antes de la cosecha.
	Biológico	40	A	Las lechugas deben de estar libres de plagas y manchas ocasionadas por enfermedades al momento de ser cosechadas. Se deben desinfectar las herramientas utilizadas para cortar las lechugas. Utilizar canastas plásticas para la cosecha.
	Físico	30	M	Las lechugas deben de cosecharse sin raíces. No debe de haber residuos de suelo, fertilizantes, plaguicidas, madera, materiales de construcción y objetos cortapunzantes dentro de las canastas de cosecha de lechuga. Durante la cosecha el personal debe utilizar guantes, mascarilla y cofia al manipular el producto. No fumar ni comer durante la operación. Las lechugas se deben lavar con agua clorada.

Fuente: elaboración propia.

3.4. Análisis del rendimiento y calidad en los cultivos cosechados

Se procedió al análisis de las características del color de las 4 cosechas, clasificándolas en color verde brillante aceptable o verde deficiente; los resultados se presentan a continuación:

Figura 41. **Comparación del porcentaje promedio de cultivos con color aceptable**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Se realizó un análisis de varianza de los resultados de los cultivos con color verde aceptable para los dos grupos de medición. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la tabla XII.

Tabla XII. **ANOVA para la variable color aceptable de las cosechas**

ANOVA					
COLOR					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8.410	1	8.410	36.949	<.001
Within Groups	90.590	398	.228		
Total	99.000	399			

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra que la prueba de igualdad de promedios es rechazada; por lo tanto, se realiza un análisis descriptivo del comportamiento de la variable dependiente, color aceptable de las cosechas dentro de cada grupo de medición.

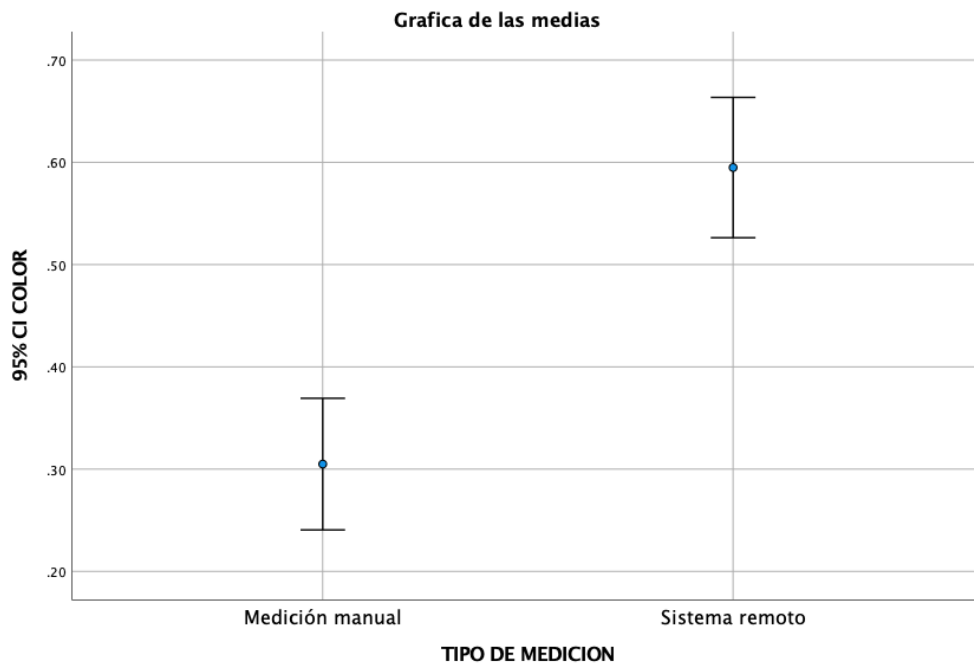
Tabla XIII. **Análisis descriptivo de la variable color de los cultivos cosechados**

Descriptives								
COLOR								
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
Verde aceptable	200	.3050	.46156	.03264	.2406	.3694	.00	1.00
Verde deficiente	200	.5950	.49212	.03480	.5264	.6636	.00	1.00
Total	400	.4500	.49812	.02491	.4010	.4990	.00	1.00

Fuente: elaboración propia.

Para visualizar de mejor forma la variación significativa de medias entre los dos grupos de medición se presenta la siguiente gráfica.

Figura 42. **Gráfica de las medias de los dos tipos de medición**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Se procedió a realizar la prueba normalidad y homocedasticidad mediante la prueba de Levene, la cual se presenta en la tabla XIV.

Tabla XIV. **Prueba de homogeneidad de varianzas para la variable color aceptable en los cultivos cosechados**

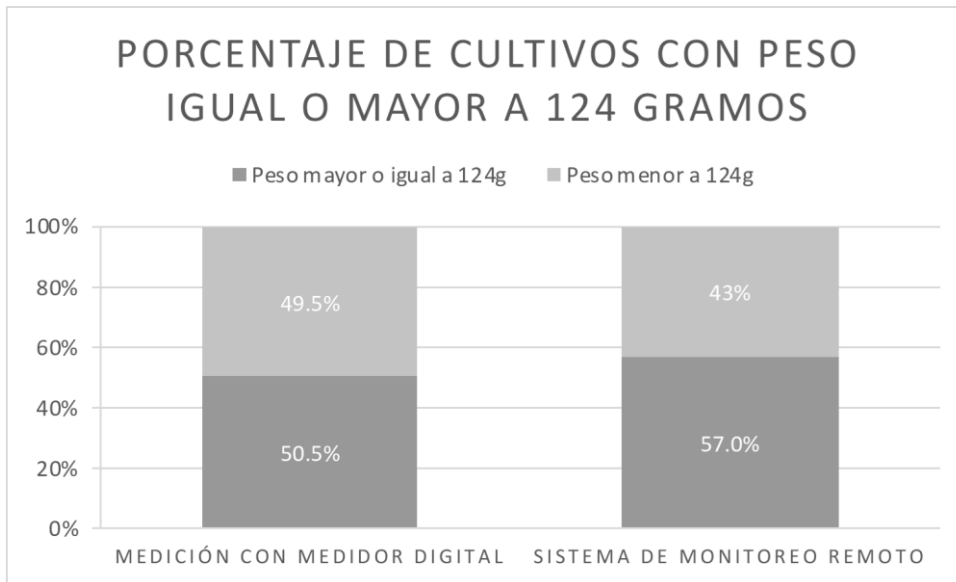
Prueba de homogeneidad de varianzas					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
COLOR	Based on Mean	16.351	1	398	<.001
	Based on Median	4.393	1	398	.037
	Based on Median and with adjusted df	4.393	1	396.375	.037
	Based on trimmed mean	16.351	1	398	<.001

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se pesaron las 200 lechugas de cada período de cosecha en una balanza con precisión de 1 gramo; se pesó únicamente la parte comestible sin la raíz.

Debido a que el promedio del peso de las cosechas antes de implementar el sistema de monitoreo remoto era de 120 gramos, se utilizó este parámetro para comparar los resultados de los pesos promedios utilizando el sistema remoto. Los resultados de la comparación de la tasa de cultivos con peso mayor a 120 gramos, utilizando ambos métodos de medición, se presentan en la figura 43.

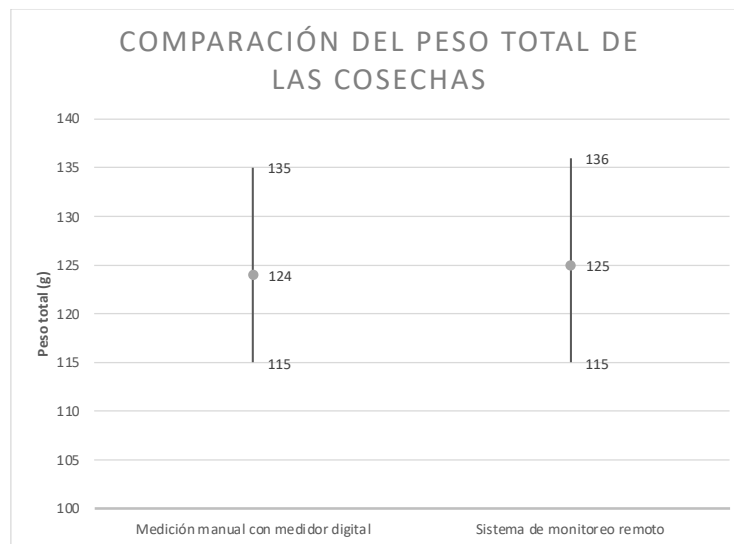
Figura 43. **Comparación del porcentaje de cultivos con peso mayor o igual a 124 gramos**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Se procedió a realizar la comparación de los promedios con su respectivos máximos y mínimos de los pesos de las cosechas en la siguiente gráfica.

Figura 44. **Comparación de los pesos máximos, mínimos y promedio de las cosechas**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

En la figura 44 se puede observar el aumento promedio de 1 gramo en el peso de las cosechas bajo el sistema de monitoreo remoto, por lo que se procedió a realizar la prueba de varianza para determinar si esta variación representa una diferencia significativa.

Tabla XV. **ANOVA para la variable peso de lechuga en gramos**

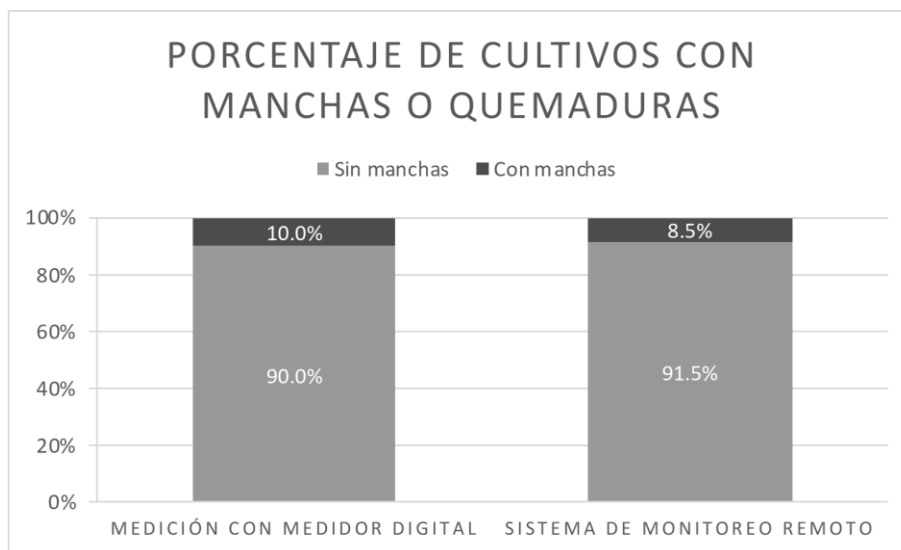
ANOVA					
PESO					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16.810	1	16.810	.467	.495
Within Groups	14324.190	398	35.990		
Total	14341.000	399			

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, la significancia es mayor que 0.05; por lo tanto no hay diferencias significativas entre los grupos con monitoreo manual y remoto del nivel de pH en la solución para la variable de peso.

Otro aspecto analizado fue el porcentaje de cultivos que presentaron manchas o quemaduras importantes en sus hojas. Se observaron las cuatro cosechas agrupadas por su método de monitoreo de la variable de pH; los resultados se presentan en la figura 45.

Figura 45. **Comparación del porcentaje de cultivos con manchas o quemaduras**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Para determinar si la variación del 1.5 % representa una diferencia significativa, se procedió a realizar la prueba de varianza.

Tabla XVI. **ANOVA para la variable presencia de manchas en las cosechas**

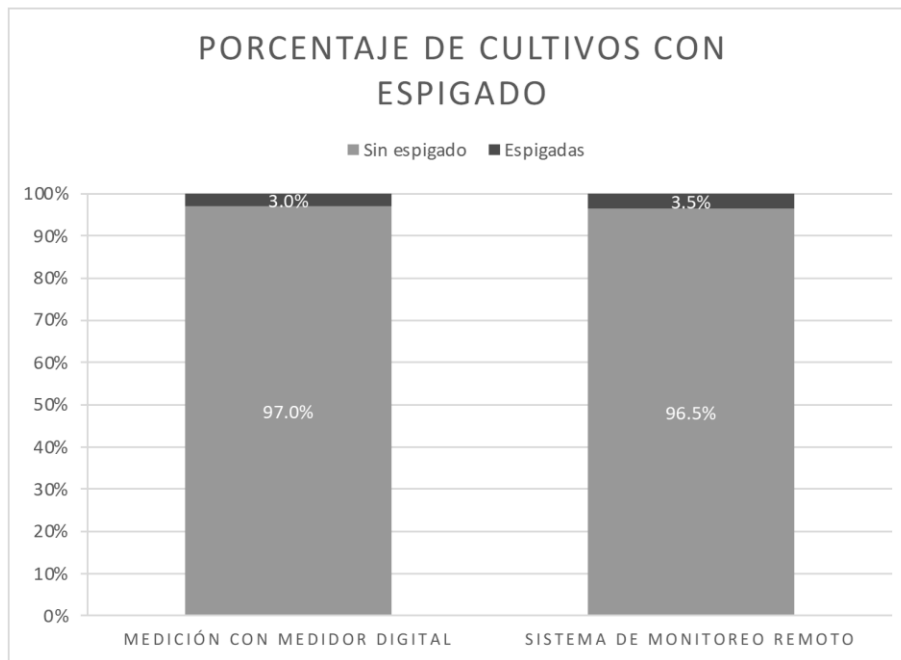
ANOVA					
MANCHAS					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.023	1	.023	.267	.606
Within Groups	33.555	398	.084		
Total	33.578	399			

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla, la significancia de 0.6 es mayor que 0.05; por lo tanto que no hay diferencias significativas entre los grupos con monitoreo manual y remoto del nivel de pH en la solución.

Otro de los análisis visuales realizado a las cosechas fue el porcentaje de cultivos que presentó espigado en su desarrollo. La comparación de las tasas de cultivos que presentaron espigados, agrupadas por método de monitoreo de la variable de pH se presenta en la figura 46.

Figura 46. **Comparación del porcentaje de cultivos con espigado**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Como se puede observar en la gráfica anterior, existe un aumento de 0.5 % de cosechas con presencia de espigado en el grupo de cultivos con sistema de monitoreo remoto. Para determinar si la variación representa una diferencia significativa, se procedió a realizar la prueba de varianza.

Tabla XVII. **ANOVA para la variable presencia de espigado en las cosechas**

ANOVA					
ESPIGADO					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.003	1	.003	.079	.779
Within Groups	12.575	398	.032		
Total	12.578	399			

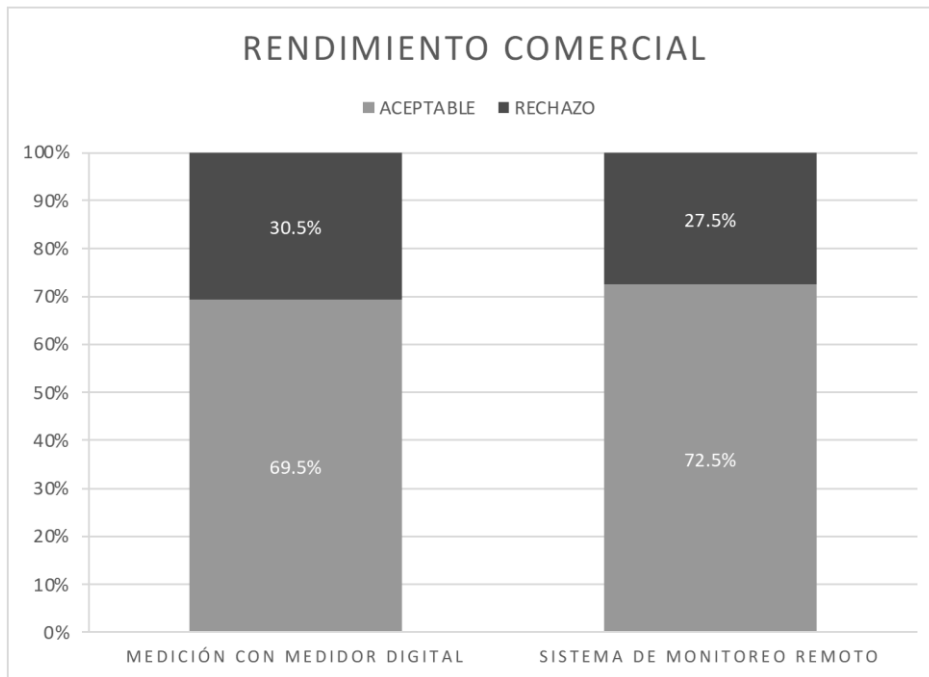
Fuente: elaboración propia.

Al observar en la tabla ANOVA anterior, se descarta que la diferencia entre los grupos con monitoreo manual y remoto del nivel de pH sea significativa.

Para determinar si una lechuga es aceptada comercialmente se debe cumplir con un peso mayor a 115 g, tener un color verde brillante, sin manchas ni hojas espigadas.

Los resultados de la comparación del porcentaje de los cultivos comercialmente aceptados frente a los cultivos rechazados de cada grupo de medición se muestran en la siguiente figura.

Figura 47. Comparación del porcentaje de cultivos aptos para ser comercializados



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Se realizó la prueba de varianza para evaluar si el aumento en el rendimiento comercial del 3 % que presentaron los cultivos con sistema de monitoreo remoto es significativo.

Tabla XVIII. **ANOVA para la variable rendimiento comercial de las cosechas**

ANOVA					
COMERCIAL					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.090	1	.090	.435	.510
Within Groups	82.270	398	.207		
Total	82.360	399			

Fuente: elaboración propia.

Con la significancia de 0.510 presentada en la tabla XVIII se acepta la igualdad de medias, por lo que no existen diferencias significativas entre los grupos.

A nivel general, se determinó que los resultados de la comparación para la variable de peso mayor a 124 gramos entre los grupos de cosechas fueron los únicos que presentaron una significancia en sus medias. A pesar de este aumento significativo del peso, el rendimiento comercial no refleja una variación importante.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Implementación del sistema hidropónico NFT

Para lograr este objetivo fue necesaria la capacitación práctica y teórica por parte del investigador ante un ente especializado en hidroponía, debido a que se requiere de conocimiento técnico sobre los aspectos que involucra el desarrollo de un proyecto de esta categoría. En este curso se implementaron varios métodos hidropónicos como sustrato sólido, raíz flotante, mangas verticales y NFT.

Tal como lo presenta Rivera (2021), en Guatemala aún existe poca información que permita comenzar un proyecto hidropónico desde cero, por lo que esta capacitación fue acompañada de investigación en línea de proyectos previos realizados en otros países.

Los costos para el desarrollo e implementación del sistema hidropónico NFT con todos sus componentes de infraestructura y tecnología son considerablemente altos en relación con la implementación de un sistema tradicional de cultivos sobre suelo; esto en concordancia con lo expuesto por Garzaro (2016).

Los recursos necesarios para la implementación del sistema hidropónico de la investigación fueron adquiridos en ferreterías y tiendas agrícolas locales, a excepción de las mangueras, válvulas de paso y equipo de comunicaciones como el *datalogger* y la sonda de pH, los cuales se obtuvieron en el exterior.

4.2. Diseño e implementación del sistema de monitoreo remoto mediante el uso de tecnologías del IoT

El recurso tecnológico utilizado para el desarrollo del sistema de monitoreo remoto de la variable de pH representa el costo más alto del proyecto. Esto se debe a que se utilizó equipo con características industriales con protocolos de comunicación de última generación.

Según las características que posea el *datalogger* como puertos de comunicación serial, entradas y salidas digitales, puertos analógicos de corriente y/o voltaje, ethernet, entre otros, se pueden agregar más sensores de monitoreo de distintas variables y realizar acciones de control en el sistema, tal como el proyecto que presenta Delgado (2020), el cual integra sensores de plagas, temperatura y humedad.

El protocolo de comunicación MQTT fue fácil de implementar y configurar en el *datalogger* una vez fueron creados los dispositivos en la plataforma de Thingspeak y generadas las credenciales de suscripción. Debido a que se dispuso de una cuenta gratuita de almacenaje y visualización de datos, Thingspeak permitió recopilar el 100 % de los registros de la variable de pH durante todos los períodos de cultivos.

Al momento de la toma de lecturas del valor de pH de forma manual durante desarrollo de los cultivos de las cosechas 1 y 2, el nivel de pH se encontró muy por arriba del límite superior de 6.5 como se observa en las figuras 35 y 36 con máximos de 8.5 y 7.9, respectivamente. Debido a que solo se realizaba una toma de lectura cada semana, no se sabe con exactitud a partir de qué momento la variable comenzó a elevarse; por lo tanto no se realizaron acciones de control previo a alcanzar estos máximos.

Contar con el monitoreo que permite visualizar los registros de los valores de pH en tiempo real, con frecuencia de cada hora, permitió visualizar la tendencia de los niveles de pH y por lo tanto realizar correcciones anticipadas, evitando de esta forma que se saliera de los valores ideales. Esto se ve reflejado en la tasa de permanencia de las lecturas de pH entre los niveles adecuados de la figura 38.

La eficiencia que representa la corrección anticipada del nivel de pH gracias a los datos presentados en tiempo real de dicha variable, lo menciona Meola (2021) con el caso de entornos de producción de cultivos con microclimas autorregulados.

Se observó que las plántulas de lechuga utilizadas se adaptaron adecuadamente al ser trasplantadas del almácigo del proveedor al sistema NFT, tal como se muestra en el cultivo en fase de desarrollo de la figura 31.

4.3. Identificar los principales riesgos de contaminación que puedan afectar la calidad e inocuidad en los cultivos hidropónicos

Se identificó que los riesgos significativos en el proceso productivo de lechuga hidropónica se concentran en la etapa de manejo del cultivo, siendo de mayor impacto en calidad e inocuidad los de tipo biológico y químico.

Los riesgos del tipo biológico están relacionados con el entorno del área del invernadero, así como la limpieza e higiene por parte del personal encargado de la manipulación de los cultivos. Se observó que los riesgos de tipo químico tienen un gran impacto en la calidad e inocuidad de las cosechas y estos se deben principalmente al uso inadecuado de agroquímicos como fertilizantes, plaguicidas y los relacionados con la solución hidropónica.

4.4. Analizar los indicadores de calidad para establecer el rendimiento productivo de los cultivos

Se realizó la prueba de varianzas entre los grupos de medición de pH manual y de forma remota en relación con el peso, presencia de manchas o Tip Burn, lechugas con espigado y de color verde aceptable y rendimiento comercial.

La variable de color verde aceptable de las cosechas fue la única que tuvo un impacto significativo al pasar de un sistema manual de toma de valores de pH a uno de monitoreo remoto de la variable de pH, ya que la tasa de aceptación pasó de un 70 % a un 74 %, respectivamente.

Para el peso de las cosechas, cuyo valor resultante fue mayor o igual a 124 gramos, se esperaba una tasa por arriba del 50 %, siendo el resultado de 57 % con un incremento del 7 %. Al realizar la prueba de varianza se determinó que esta diferencia no es significativa; esto se puede observar en la gráfica de la figura 42, en donde la comparación de promedios indica que únicamente aumentó en un gramo.

4.5. Determinar los beneficios del IoT en hidroponía

El acceso a las mediciones de pH de forma remota desde cualquier ubicación geográfica en donde se cuente con conexión a internet ayudó en la eficiencia en la utilización de los recursos tanto económicos como humano.

Otro beneficio importante fue el almacenamiento de las lecturas de los niveles de pH durante cada cosecha, para su posterior análisis e identificación de mejoras en los tratamientos y aplicación de fórmulas de nutrientes.

Los huertos hidropónicos urbanos son una alternativa para producir alimento de calidad en espacios reducidos y en corto tiempo, lo cual representa una alternativa para promover la seguridad alimentaria y nutricional, reducir la distancia entre productores y consumidores, solucionar problemas de abastecimiento y ayudar al desarrollo económico del país.

CONCLUSIONES

1. Se implementó un sistema de monitoreo remoto para conocer los niveles de pH en agua de solución de un sistema hidropónico NFT, los cuales tuvieron una tasa de permanencia del 67 % dentro de los valores de 5.5 a 6.5 para los períodos de cosecha 3 y 4. La mejora en la calidad y rendimiento de las cosechas se vio reflejada de forma significativa en el tono de color verde aceptable, el cual tuvo un incremento del 4 %. Por lo que, un sistema de monitoreo remoto junto a las 28 recomendaciones basadas en las BPA puede ayudar a minimizar los tipos de contaminación biológica, química y física identificadas en las tres etapas de la cadena de producción hidropónica en huertos urbanos.
2. Se realizó un análisis de los métodos de medición de pH con tira de papel, medidor digital y sonda con comunicación remota para conocer su uso, ventajas y desventajas. Se determinó que de los tres métodos, la tira de papel es práctica, de bajo costo para un volumen bajo de lecturas y con alta intervención humana; mientras que la sonda requiere de un sistema adicional, es de alto costo inicial, aunque de elevado rendimiento al realizar altos volúmenes de mediciones al día, de forma automática; por lo que requiere mínima manipulación humana.
3. En relación con la calidad, los indicadores cualitativos y cuantitativos fueron el punto de partida para cumplir con los objetivos de mejora en la estandarización y rendimiento de las cosechas; esto permitió realizar ajustes de los límites después de cada una de ellas.

4. Se determinó que responder de forma más rápida ante los cambios de niveles de pH y realizar el ajuste correspondiente para mantener la permanencia de los niveles dentro del rango adecuado, fueron los principales beneficios del monitoreo remoto de la variable de pH en un sistema hidropónico NFT.

RECOMENDACIONES

1. Es conveniente utilizar la técnica de hidroponía por NFT en huertos urbanos como alternativa de producción de cultivos en pequeños predios, con la intención de producir alimentos para el autoconsumo y comercialización, para fomentar nuevos canales de producción y abastecimiento de alimentos en el país.
2. Se deben implementar y seguir los lineamientos que las BPA recomiendan para la producción de cultivos en huertos hidropónicos para asegurar la inocuidad de las cosechas, principalmente los relacionados con riesgos de contaminación biológica y química.
3. Se sugiere adquirir los pilones en un establecimiento que cumpla con las normas sanitarias y de buenas prácticas para evitar problemas de patógenos en el sistema, y así garantizar la inocuidad en las etapas previas al trasplante.
4. Se hace necesario monitorear la temperatura de la solución recirculante en las tuberías y depósito del sistema NFT, para evitar hongos y pérdida de cultivos; debe verificarse también la cantidad de horas y porcentaje de luz que incide sobre los cultivos para evitar pérdidas debido a la elongación por falta de luz. Además, se recomienda agregar más sensores para el monitoreo de otras variables del agua de solución como temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (iones disueltos).

REFERENCIAS

1. Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT) (s.f.). *Buenas prácticas aplicadas a los alimentos*. Monserrat, Buenos Aires, Argentina, Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/portafolio_educativo/pdf/cap4.pdf.
2. Andreau, R., Beltrano, J. y Giménez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Buenos Aires, Argentina: D – Editorial, Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1.
3. Baixauli Soria, C. y Aguilar Oliva, J. M. (2002). *Cultivo sin suelo de Hortalizas*. Valencia, España: Editorial Generaliat.
4. Brown, I. y Lux Research Inc. (s.f.). *A detailed breakdown of LPWAN technologies and providers*. Boston, Estados Unidos de América. Recuperado de http://web.luxresearchinc.com/hubfs/Insight_Breakdown_of_LPWAN_Technologies.pdf?t=1461874447328.
5. Carranza, T., Scattolini, A. y Vexenat, L. (2019). *Hidroponía en lechuga: aplicación de BPA y BPM para la obtención de un producto de calidad*. Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/18920/Carranza%2c%20T.%2c%20Scattolini%2c%20A.%2c%20Vexenat%2c%20L.%20-%20Hidropon%20en%20lechuga%20aplicaci%20b3n>

%20de%20BPA%20y%20BPM%20para%20la%20obtenci%3%b3n
%20de%20un%20product~1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

6. Carrega, E. y Enrich, N. (2014). *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para la producción de frutas y hortalizas frescas en Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección General de la Granja (DIGEGRA). Recuperado de https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/guia%20de%20buenas%20practicass%20agricolas%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20frutas%20y%20hortalizas%20frescas%20en%20Uruguay_compressed.pdf.
7. Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (2010). *Manual de buenas prácticas agrícolas*. San José, Costa Rica: CEGESTI.
8. Chowdhury, M., Khandakar, A., Ahmed, S., Al-Khuzaei, F., Hamdalla, J., Haque, F., Reaz, M. B. I., al Shafei, A. y Al-Emadi, N. (2020). *Design, construction and testing of iot based automated indoor vertical hydroponics farming test-bed in Qatar*. Qatar. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/s20195637>.
9. Comisión Nacional Buenas Prácticas Agrícolas (2007). *Especificaciones técnicas de buenas prácticas agrícolas para la producción de frutales*. Chile: Ministerio de Agricultura. Recuperado de <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/17836>.
10. Constanza, P. y Villegas, B. (2009). *Mis buenas prácticas agrícolas guía para agroempresarios*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura

y Desarrollo Rural (958-8536) Corporación Colombia Internacional.
Recuperado de <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/inocuidad-agricola/capacitacion/cartillabpa.aspx>

11. Jaramillo, J., Rodríguez, V., Guzmán, M., y Zapata, M. (2007). *Manual técnico: buenas prácticas agrícolas en la producción de tomate bajo condiciones protegidas*. Medellín, Colombia: Recuperado de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13469/43123_50544.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
12. Dahlman, E., Parkvall, S., y Sköld, J. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Oxford, UK: Elsevier/Academic Press. Recuperado de <https://books.google.com.gt/books?id=DLbsq9GD0zMC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
13. Delgado Hernández, V. (2020). *Innovaciones tecnológicas agrícolas: oportunidades para enfrentar la crisis por el COVID-19 en América Latina*. San José Costa Rica: IICA. Recuperado de <https://repositorio.iica.int/handle/11324/20552>.
14. Dolui, K. (2017). *Cloud platforms for the internet of things: how do they stack up in a real-world application?* Politécnico Di Milano. Recuperado de https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/131959/3/2016_12_DOLUI.pdf.
15. Díaz, A. (2008). *Buenas prácticas agrícolas: guía para pequeños y medianos agroempresarios*. Tegucigalpa, Honduras: IICA. Recuperado de <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/18970/CDHN21108080e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

16. Egli, P. (2016). *An Introduction to mqtt, a protocol for M2M and lot applications*. USA: MQTT. Recuperado de http://www.indigoo.com/dox/wsmw/1_Middleware/MQTT.pdf.
17. Endress+Hauser (2015). *pH measurement in industrial processes* (Selection and engineering guide for your industry and application). USA: Endress + Hauser. Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf.
18. Evans, D. y Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) (2011). *Internet de las cosas cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. México: Cisco. Recuperado de https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf.
19. FAO (2004). *Manual de microhuertos en Venezuela (programa especial de seguridad alimentaria - agricultura urbana y periurbana)*. Brigada del Ejército Venezolano y el Ministerio de Agricultura y Tierras, Recuperado de http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/2911/doc_238.pdf
20. FAO (s. f.). *Frente al COVID-19, los agricultores urbanos bolivianos se replantean cómo trabajar*. Estados Unidos: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1297548/>.
21. Fuentelsaz, F., Peiteado, C., Hernández, L., Badillo, M., y Porcuna, J. (2015). *Buenas prácticas agrícolas para la conservación de los recursos naturales*. Madrid, España: WWF/Adena.

22. Garzaro, B. D. (23 abril de 2016). Cultivos del futuro. Prensa Libre, Guatemala. Recuperado de <https://www.prensalibre.com/economia/cultivosdel-futuro/>.
23. Gharsellaoui, B. (2019). *Internet of things prototyping with Firebase: how to do more with less*. USA: Freecode. Recuperado de <https://www.freecodeamp.org/news/iot-prototyping-with-firebase-doing-more-with-less-2f5c746dac8b/>.
24. Instituto Español de Estudios Estratégicos. (2018). *Internet de las cosas. Horizonte 2050*. España: IEEE. Recuperado de http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_investig/2018/DIEEEINV17-2018_Internet_de_las_Cosas_Horizonte_2050.pdf.
25. Libelium Comunicaciones Distribuidas S. L. (2018). *Waspote LoRaWAN Networking Guide*. Zaragoza, España. Recuperado de <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>.
26. Link Labs, Inc. (2016). *A comprehensive look at low power, wide area networks*. USA: Link Labs. Recuperado de <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/427771/LPWAN-Brochure-Interactive.pdf>.
27. LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup. (2015). *LoRaWAN™ what is it? (a technical overview of LoRa® and LoRaWAN™)*. USA: LoRaWan. Recuperado de <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>.

28. Madhumitha, M., Nikhil, N. y Bhupendra, P. (2019). A survey on LPWAN technologies in content to IoT applications. Ideas and Innovations in Technology. *International Journal of Advance Research*. India: Jariit. Recuperado de www.ijariit.com.
29. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. y Meyer, F. (2018). *Overview of cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT*. USA: Sigfox. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/percomw.2018.8480255>.
30. Meola, A. (2 de febrero, 2021). Smart Farming in 2020: how IoT sensors are creating a more efficient precision agriculture industry. USA: *Business Insider*. Recuperado de <https://www.businessinsider.com/smart-farming-iot-agriculture>.
31. Mobberley, C. (s.f.). *Raspberry Pi hosting node-red*. USA: Adafruit Industries. Recuperado de <https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-hosting-node-red>.
32. Morales, C. (2009). *Buenas prácticas agrícolas. Aspectos relevantes en la producción de frambuesa (Rubus idaeus L.)* Argentina: Centro Regional de Investigación Raihuen. Recuperado de http://www.latranqueraweb.com.ar/web/archivos/menu/Aspectos_de_su_produccion.pdf.
33. Nicolas, B., y Lucie, B. (2018). *Real-Time database: Firebase*. USA: Firebase. Recuperado de https://ftp.utcluj.ro/pub/users/civan/IBD/3_EVALUARE/1_Referat/Resurse/B_2017_firebase.pdf.

34. OFCOM (2017). *Frequency bands designated for Industrial, Scientific and medical use (ISM)*. USA: OFCOM. Recuperado de https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0022/103297/fat-ism-frequencies.pdf
35. Oficina de Gestión Integral y Mejoramiento Continuo (2016). *Buenas prácticas agrícolas*. República de Colombia: ICA. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/areas/agricola-pecuaria/bpa-bpg.aspx>.
36. Ordóñez, H. (2002). *La calidad y los agroalimentos*. En: Apuntes del Programa de Agronegocios y Alimentos. Argentina: FAUBA. Recuperado de https://www.academia.edu/8551984/PROGRAMA_DE_AGRONEGOCIOS_Y_ALIMENTOS_FACULTAD_DE_AGRONOMIA_UNIVERSIDAD_DE_BUENOS_AIRES_PROFESOR_H%C3%89CTOR_ORD%C3%93%C3%91EZ_AGOSTO_2000.
37. Organización Mundial del Comercio (2009). *Efectos de las normas privadas relacionadas con cuestiones sanitarias y fitosanitarias - recopilación de respuestas*. Argentina: Comité de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias. Recuperado de <http://www.puntofocal.gov.ar>.
38. Pérez, F. (2010). *Redes Móviles Terrestres: 4G*. España: Universidad Pontificia Comillas. Recuperado de <http://www.tierradelazaro.com/wp-content/uploads/2016/04/4G.pdf>.
39. Prajzler, V. (2015). *LoRa, LoRaWAN and LORIoT*. Switzerland. Recuperado de <https://www.loriot.io/lora-lorawan-loriot.html>.

40. Ramos García, D. (15 de junio, 2021). Tecnología IoT: agricultura inteligente para mejorar la productividad de tu explotación. *Revista Agricultura*. Recuperado de http://www.revistaagricultura.com/advantech/innovacion/tecnologia-iot-agricultura-inteligente-para-mejorar-la-productividad-de-tu-explotacion_13281_121_16569_0_1_in.html.
41. Raza, U., Kulkarni, P. y Sooriyabandara, M. (2017). *Low power wide area networks: an overview*. Nueva York: Cornell University. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/1606.07360.pdf>.
42. Red de Buenas Prácticas Agropecuarias de Argentina. (2015). *Buenas Prácticas Agrícolas: síntesis de los lineamientos de base*. Argentina: RBPA. Recuperado de <http://www.redbpa.org.ar/>.
43. Rivera, M. I. (2021). *Hidroponía: agricultura sostenible*. Guatemala: República.gt. Recuperado de <https://republica.gt/vive-guatemala/2021-1-22-0-39-13-hidroponia-agricultura-sostenible>.
44. Rosales Caniz, H. S. (2010). *Huerto hidropónico casero para la seguridad alimentaria de las familias del área rural del municipio de Santa María Chiquimula, Totonicapán (estudio de mercado y financiero)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Occidente. Recuperado de <http://www.postgrados.cunoc.edu.gt/tesis/95c85154d0958928038078894305a3e41c448c3a.pdf>.
45. Rose, K., Eldridge, S., Chapin, L. (2015). *La internet de las cosas — una breve reseña*. Virginia, Estados Unidos: Internet Society (ISOC).

Recuperado de <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>.

46. Roveló, R. (2020). *Huertos urbanos, solución a la vulnerabilidad alimentaria por COVID*. México: Libero. Recuperado de <https://libero.mx/>. <https://libero.mx/prensa/huertos-urbanos-solucion-la-vulnerabilidad-alimentaria-por-covid>.
47. SCIFORCE. (2019). *Smart farming: the future of agriculture*. Ukraine: Sciforce. Recuperado de <https://www.iotforall.com/smart-farming-future-of-agriculture/>.
48. Semtech. (s.f.). *What is LoRa? | Semtech LoRa Technology*. California, Estados Unidos: Semtech Corporation. Recuperado de <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
49. Sensorex (s.f.). *pH Sensors for water and Wastewater Monitoring* | Sensorex. Estados Unidos: Cannon Water. Recuperado de <https://sensorex.com/ph-sensors-3/>.
50. Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad (2014). *Guía ilustrada de buenas prácticas agrícolas para la producción con inocuidad de frutas y hortalizas, considerando el Cambio Climático*. La Paz, Bolivia: Unidad de Comunicación y Relaciones Públicas – PROAGRO. Recuperado de <https://www.bivica.org/files/inocuidad-frutas-hortalizas.pdf>.

51. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. (2010). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas*. Recuperado de <http://www.senasa.gov.ar>.
52. Sifuentes, M. (2013),. *Manual para productores: Buenas Prácticas Agrícolas paso a paso*. Ministerio de Agricultura y Riego de Perú. Lima, Perú: Praise inversiones S.A.C. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/inocuidad-agricola/capacitacion/cartillabpa.aspx>.
53. Sigfox (s.f.). *Sigfox Technology Overview*. Labège, Francia: Sigfox. Recuperado de <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>.
54. Smee, J. & Qualcomm Technologies (2019). *As 5G launches globally, what comes next? Qualcomm*. San Diego, California, Estados Unidos. Recuperado de <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/09/24/5g-launches-globally-what-comes-next>
55. Takaya, I., Kazuki, N., e Hitachi Co., Ltd. (2018). *Introduction of the IoT platform Node-RED and Hitachi's activities*. Tokio, Japón. Recuperado de [https://events.linuxfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/Introduction-of-the-IoT-Platform-Node-RED-and-Hitachi_s-Activi ties-OSS-Takaya-Ide-_Kazuki-Nakanishi.pdf](https://events.linuxfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/Introduction-of-the-IoT-Platform-Node-RED-and-Hitachi_s-Activities-OSS-Takaya-Ide-_Kazuki-Nakanishi.pdf).
56. Tello Cano, G. V. (2010). *Evaluación de huertos hidropónicos como modelos económico productivos para seguridad alimentaria y disminución de pobreza en Suchitepéquez y Retalhuleu*. Guatemala:

Senacyt. Recuperado de <http://glifos.senacyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%202008.46.pdf>.

57. Thompson, J. & Qualcomm Technologies, Inc. (2019). Mobile has made a leap every ~10 years. The Future of 5G. Wisconsin, Madison. Recuperado de <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/2019-future-of-5g-presentation.pdf>.
58. Tigli, Y. (2016). *Tutorial: MQTT (message queuing telemetry transport)*. Francia: University of Nice Sophia Antipolis. Recuperado de http://www.tigli.fr/lib/exe/fetch.php?media=cours:tutorial_mqtt_mit_2015_2016.pdf.
59. Tschofenig, H., Arkko, J., Thaler, D. y McPherson, D (2015). *Architectural considerations in smart object networking*. USA: Internet Architecture Board (IAB). Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>.
60. Urrestarazu, G., Berjon, M., Adams, P., Moreno, T., Salas, M., Santos, M. y Varela, D. (2004). *Tratado de cultivo sin suelo*. Almería, España: Editorial Mundi Prensa. Recuperado de <https://www.scribd.com/document/463967643/Tratado-de-Cultivo-Sin-Suelo-Miguel-Urrestarazu-Gavilan>.
61. Valle Hernández, L. (s.f.). *Guía de introducción a MQTT con ESP8266 y Raspberry Pi*. España: Programar Fácil. Recuperado de <https://programarfácil.com/esp8266/mqtt-esp8266-raspberry-pi/>

62. Viglizzo, E. (2004). *Desarrollo de una metodología compatible con la norma ISO 14000 para la eco-certificación de predios rurales*. Guatemala: Programa Nacional de Gestión Ambiental, INTA.
63. Winsor G. y Schwarz M. (1990). *Soilless culture for horticulture crop production*. *FAO Plant Production and Protection Paper*, Publication Rome, Italy. Recuperado de <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF9102335>.
64. Yuan, M. (2018). *Conociendo MQTT*. USA: IBM Corporation. Recuperado de <https://www.ibm.com/developerWorks/ssa/>.

APÉNDICES

Apéndice 1. Capacitación teórica y práctica en métodos hidropónicos (mangas verticales)



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala.. 2021).
Colección particular. Guatemala.

**Apéndice 2. Capacitación teórica y práctica en métodos hidropónicos
(caja con sustrato sólido)**



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala.. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 3. **Capacitación teórica y práctica en métodos hidropónicos
(raíz flotante)**



Fuente: [Fotografía de José Alejandro Pablo]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala.. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 4. Instrumento de recolección de datos: Identificación de riesgos significativos de contaminación

El instrumento de recolección de datos utilizado para la identificación de los riesgos de contaminación significativos es el siguiente:



Ficha para identificación de riesgos de contaminación

Proyecto: sistema de cultivo hidropónico NFT
Ubicación: huerto urbano ciudad de Guatemala
Fecha:

No.	Etapas del proceso	Riesgo Químico	Riesgo Biológico	Riesgo Físico	Probabilidad 10,20,30,40,50	Impacto B,M,A	BPA
1				✓			
2		✓					
3			✓				
4			✓				
5				✓			
6				✓			
7			✓				
8				✓			

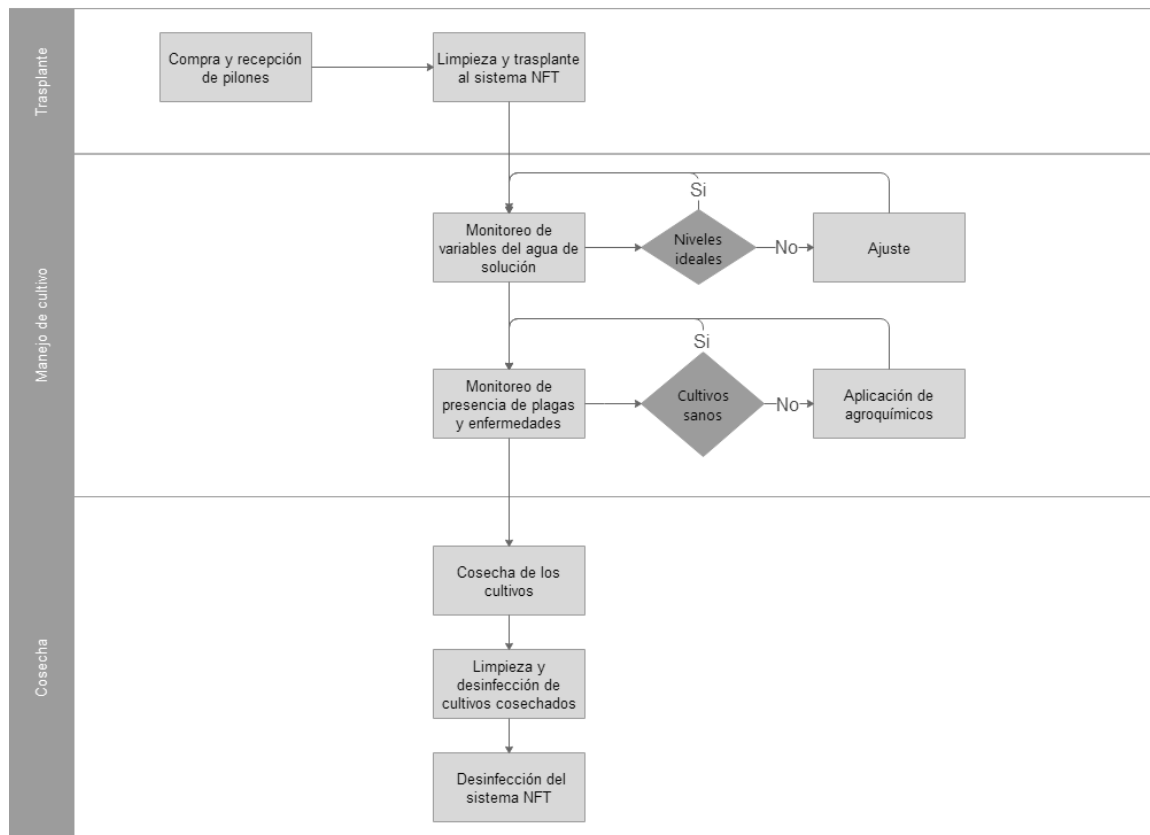


ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama de flujo del proceso

El diagrama de flujo del proceso de cultivo de lechuga hidropónica se presenta a continuación:



Fuente: elaboración propia, utilizando Visio 2013.

Apéndice 6. Instrumento de recolección de datos: Ficha de trazabilidad para la etapa de trasplante

La ficha de trazabilidad para la etapa de trasplante en el proceso de producción de lechuga hidropónica se presenta a continuación:

Ficha de trazabilidad para la etapa de trasplante

Proyecto: sistema de cultivo hidropónico NFT
Ubicación: huerto urbano ciudad de Guatemala
Fecha:

Datos del proveedor	
Nombre:	
Teléfono:	
Dirección:	

Datos del producto	
Variedad:	
Cantidad:	
Tipo de sistema utilizado:	
Sustrato:	
Altura promedio:	
Peso promedio:	
Uso de semilla certificada	

Firma



ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Instrumento de recolección de datos: Ficha de trazabilidad para la etapa de desarrollo del cultivo

La ficha de trazabilidad para la etapa del desarrollo del cultivo en el proceso de producción de lechuga hidropónica se presenta a continuación:



Ficha de trazabilidad para la etapa de desarrollo

Proyecto: sistema de cultivo hidropónico NFT
Ubicación: huerto urbano ciudad de Guatemala
Fecha:

Datos del cultivo			
Variedad:		Sustrato:	
Cantidad:		Origen:	

Datos del agua	
Análisis químico:	
Análisis microbiológico:	
Frecuencia de análisis:	
Frecuencia de renovación:	
Cantidad utilizada (ml):	

Datos de la solución Nutritiva	
Cantidad que se aplica (ml):	
Frecuencia de renovación:	

Uso de productos fitosanitarios			
Nombre del principio activo:		Fecha de aplicación:	
Plaga a controlar:		Dosis:	



☐ Text

☐

☐

Firma



ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
 FACULTAD DE INGENIERIA

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Instrumento de recolección de datos: Ficha de trazabilidad para la etapa de cosecha

La ficha de trazabilidad para la etapa de cosecha en el proceso productivo de lechuga hidropónica se presenta a continuación:

Ficha de trazabilidad para la etapa de cosecha

Proyecto: sistema de cultivo hidropónico NFT
Ubicación: huerto urbano ciudad de Guatemala
Fecha:

Datos de los cultivos cosechados	
Variedad:	
Días de trasplante a cosecha:	
No. de plantas cosechadas:	
Peso neto promedio:	
Altura promedio:	
No. de cultivos con tono verde deficiente:	
No. de cultivos con con manchas o quemaduras:	
No. de cultivos con espigado:	
Pérdidas (%):	

Firma

 ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Fuente: elaboración propia.