

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



“IoT y agricultura 4.0:

Control de cultivos en función de la
conductividad eléctrica del suelo”

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre - 2022

AUTOR: Isabel Llamas Ortega

DIRECTOR: Salvador Alcaraz Carrasco



Resumen

Actualmente, uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, es “Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de diversidad biológica” [1].

Para ello, el objeto de estudio de la investigación es el control de cultivos en función del valor de la conductividad eléctrica del suelo. Mediante este parámetro, se estudiará el esfuerzo que realizan las raíces de las plantas para absorber los nutrientes de la solución de fertilizantes aportada. En caso de que ese valor se encuentre por encima del óptimo, la planta tendrá que esforzarse en mayor medida para extraer los nutrientes, conllevando un gasto adicional de energía que influirá negativamente en el rendimiento de la producción.

Como solución, se propone emular un escenario en Mininet-Wifi de un cultivo en el que cada planta lleva un sensor (que actúa de publicador según el protocolo MQTT), produce valores aleatorios de conductividad, se lo transmite a un dron (bróker) que vigila la zona y este se lo comunica a la antena que esté suscrita (suscriptor).

Finalmente, en función del parámetro que reciba, habrá que actuar sobre la planta.

Palabras clave: ODS, conductividad eléctrica, protocolo MQTT, cultivo.



Abstract

Currently, one of the Sustainable Development Goals, SDGs, is to "Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss".

To this end, the object of study of the research is the care of crops according to the value of the electrical conductivity of the soil. This parameter is used to study the effort made by plant roots to absorb nutrients from the fertiliser solution provided. If this value is above the optimum, the plant will have to make a greater effort to extract the nutrients, leading to an additional expenditure of energy that will have a negative influence on the productive yield.

As a solution, it is proposed to emulate a scenario in Mininet-Wifi of a crop in which each plant carries a sensor (which acts as a publisher according to the MQTT protocol), produces random values of conductivity, transmits it to a drone (broker) that monitors the area and this communicates it to the subscribed antenna (subscriber).

Finally, depending on the parameter it receives, it will be necessary to act on the plant.

Keywords: ODS, electrical conductivity, MQTT protocol, crop.



Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a la UMH por concederme la beca de prácticas en actividades de fomento de la investigación (PAFI) que ha hecho posible la realización de este trabajo. A mi tutor Salvador Alcaraz Carrasco y al departamento de Ingeniería de computadores por acogerme estos meses.

También, a mis compañeros de carrera y en especial, a mi grupo de amigos por haber encontrado en ellos una amistad para toda la vida.

Dar las gracias a mis padres por todo su esfuerzo durante estos años para que nunca me faltara de nada y permitirme dedicar todo mi tiempo al estudio. A mi tío, por haberme ayudado y apoyado en todo momento.

A todos ellos, gracias.





Índice

Resumen	3
Abstract	5
Agradecimientos	7
Índice figuras	11
Índice tablas	13
Capítulo 1. Introducción	15
1.1 Motivación	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Estructura de la memoria	16
Capítulo 2. Estado del arte	17
2.1 Botánica.....	17
2.1.1 Nutrición de las plantas	17
2.1.2 Tipos de suelo.....	19
2.2 Conductividad eléctrica del suelo	20
2.2.1 Efecto de la salinidad en la agricultura.	21
2.2.1.1 Rendimiento	21
2.2.1.2 Síntomas	22
2.2.1.3 Consecuencias	23
2.3 IoT.....	24
2.3.1 Arquitectura IoT.....	24
2.3.2 Ejemplos IoT	25
2.3.3 Agricultura 4.0	26
2.3.3.1 Las tecnologías de la agricultura 4.0 y la gestión de los datos.....	27
Capítulo 3. Herramientas e instalación	35
3.1 MQTT.....	35
3.1.1 Estructura mensaje MQTT	35

3.1.2 ¿Por qué trabajar con este protocolo?.....	35
3.1.3 Arquitectura de publicación/suscripción de MQTT	36
3.2 Mosquitto	37
3.3 Mininet	38
3.3.1 Características Mininet.....	38
3.4 Mininet-wifi	39
3.5 Miniedit	40
3.6 Instalación herramientas	41
3.7 Trabajando con el emulador	42
3.7.1 Desde línea de comandos	42
3.7.1.1 Topología simple.....	43
3.7.1.2 Topología lineal.....	43
3.7.2 Miniedit	44
3.7.3 Script en Python	45
Capítulo 4. Implementación práctica	47
Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras	55
5.1 Conclusiones	55
5.2 Futuras líneas de investigación	56
Bibliografía.....	57

Índice figuras

Figura 1: Estructura raíz de una planta	18
Figura 2: Corte transversal de una raíz	18
Figura 3: Comparativa suelos sano y salino	19
Figura 4: Rendimiento en diferentes cultivos.....	21
Figura 5 [12]: Síntomas efecto salinidad	22
Figura 6 [12]: Síntomas efecto salinidad.....	23
Figura 7 [13]: Síntomas efecto salinidad	23
Figura 8 [14]: Aplicaciones IoT	26
Figura 9 [21]: Vista dron con cámara termográfica	28
Figura 10 [23]: Vista dron con cámara RGB.....	29
Figura 11 [25]: Vista dron con cámara multiespectral	30
Figura 12 [31]: Sensor de suelo.....	32
Figura 13 [31]: Implementación sensor.....	33
Figura 14 [32]: Sensor de clima y Figura 15 [34]: Aplicación sensor	33
Figura 16: Sensor de control de agua y Figura 17: Implementación sensor.....	34
Figura 18: Estructura mensaje MQTT.....	35
Figura 19: Ejemplo protocolo MQTT	37
Figura 20: Ventana gráfica MiniEdit.....	40
Figura 21: Topología simple.....	43
Figura 22: Topología lineal	43

Figura 23: Ejemplo MiniEdit.....	44
Figura 24: Ejecución ejemplo de Miniedit	45
Figura 25: Gráfico del ejemplo MiniEdit	45
Figura 26: Contenido directorio examples	46
Figura 27: Gráfico Mininet-Wifi script mobility.py.....	46
Figura 28 [46]: Cartografía cultivo de aguacates en la Comunidad Valenciana.....	47
Figura 29: Riesgo salinidad del suelo y Figura 30: Conductividad Eléctrica	48
Figura 31: Posiciones sensores	52



Índice tablas

Tabla 1: Valores de rendimiento en diferentes cultivos	22
Tabla 2: Comandos protocolo MQTT	38
Tabla 3: Ejemplo protocolo MQTT.....	38





Capítulo 1. Introducción

En la cumbre de las naciones unidas celebrada el 25 de septiembre de 2015, se alcanzó un acuerdo internacional para erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos en el marco de un programa de desarrollo sostenible con 17 objetivos, siendo el número 15, “Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad” [1], el que concierne a esta investigación.

Centrándose en el objetivo 15, este proyecto estudiará en profundidad uno de los parámetros que influyen en el rendimiento del cultivo: la conductividad eléctrica del suelo, que se define como la capacidad de transmitir corriente eléctrica en el agua.

Hoy en día, gracias a los avances de la tecnología, y en especial al IoT (*Internet of things*), se nos permite emular, es decir, imitar situaciones de la vida real en un entorno virtual con el fin de conseguir resultados similares. En esta investigación, empleando el emulador de redes Mininet-wifi y haciendo uso del protocolo MQTT, se creará un escenario de una plantación en el que, por medio de comunicaciones entre sensores, drones y antenas, se realizará un seguimiento del rendimiento del cultivo y se plantearán soluciones para mejorar la producción.

1.1 Motivación

El presente proyecto tiene por objeto principal explicar detalladamente mediante emulaciones en entornos virtuales, cómo afecta la conductividad eléctrica del suelo en el rendimiento de los cultivos y la importancia de una rápida intervención en caso de peligro.

Se ha elegido este tema porque es un asunto relevante desde el punto de vista medioambiental, por la facilidad de acceso a la información, las herramientas a emplear y, que se puede aplicar a situaciones reales.

La investigación forma parte del programa de becas de prácticas en actividades de fomento en la investigación (PAFI).

1.2 Objetivos

La investigación tiene por objetivo aplicar los conocimientos teóricos a un terreno práctico, es decir, proponer un escenario aplicable al mundo real con los conocimientos adquiridos. Entre los objetivos, destacan los siguientes:

- Estudiar en detalle todo lo relacionado con la agricultura 4.0, la nutrición de las plantas y la conductividad eléctrica.
- Profundizar en los conceptos más relevantes de las menciones de telecomunicaciones: sensores y drones (Electrónica), antenas (Sistemas) y protocolos de comunicación (Telemática).
- Diseñar e implementar un escenario empleando el protocolo MQTT, junto a la herramienta Mosquitto, en el emulador de redes Mininet-wifi mediante el lenguaje de programación Python.
- Analizar las comunicaciones y conexiones entre sensores, drones y antenas según el protocolo MQTT y realizar pruebas.

1.3 Estructura de la memoria

- Capítulo 1. Introducción: Contiene la introducción, la motivación, objetivos y estructura del trabajo.
- Capítulo 2. Estado del arte: Exposición teórica de conceptos esenciales para el proyecto y el estado en el que se encuentran las investigaciones.
- Capítulo 3. Herramientas e instalación: Explicación de los emuladores, protocolos y pruebas en Mininet-wifi.
- Capítulo 4. Implementación práctica: Cultivo de aguacate en la Comunidad Valenciana.
- Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros: Conclusiones y líneas futuras de investigación.

Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se expondrán y desarrollarán los conceptos en los que se fundamenta la investigación. En primer lugar, se explicarán algunos aspectos relacionados con la botánica, como el proceso de nutrición de las plantas y los tipos de suelo; después, la conductividad eléctrica del suelo y cómo afecta en los cultivos; y por último el IoT, en el que se comentarán su arquitectura, ejemplos y aplicación en la agricultura 4.0, donde se profundizará en las tres herramientas fundamentales del trabajo: drones, sensores y antenas.

2.1 Botánica

En este apartado se explican el proceso de nutrición de las plantas, fotosíntesis, y los diferentes tipos de suelos.

Las plantas son organismos autótrofos, es decir, son capaces de elaborar su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas como el agua y el dióxido de carbono. A su vez, estos organismos pertenecen a la familia de los fotosintetizadores ya que son capaces de elaborar su propio alimento a partir de estas dos sustancias inorgánicas más la energía solar. Con esas sustancias, las plantas fabricarán su propio alimento como la glucosa y el oxígeno, que no solamente les servirá a ellas sino también a otros seres vivos [3]. Así, en 1893, Charles Barnes, propuso que, a este proceso, a través del cual las plantas obtienen energía y liberan oxígeno se le denominara fotosíntesis [4].

2.1.1 Nutrición de las plantas

Este proceso lo forman cuatro fases: absorción, circulación, fotosíntesis y alimentación. Como el objeto de estudio de la investigación se centra en lo que sucede al principio del proceso, solamente se explicarán las fases de absorción y circulación.

Como se observa en la Figura 1 [5], por medio de la raíz y en concreto, de los pelos absorbentes, la planta absorbe el agua y las sales minerales, que forman la savia bruta, el alimento que todavía no se ha procesado.

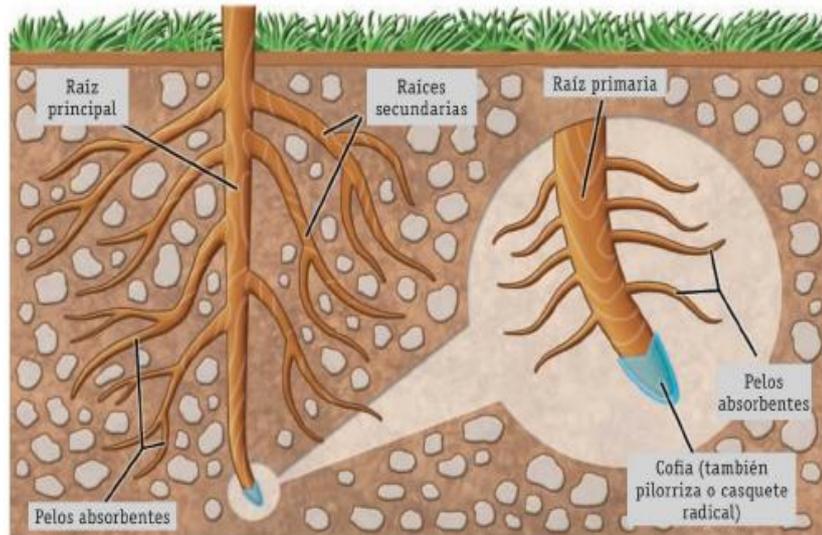


Figura 1: Estructura raíz de una planta

La savia bruta asciende por los conductos del xilema (tejido que forma parte de la planta y mediante el cual pueden circular diferentes líquidos como la savia) y se extiende al resto de la planta a través del tallo y sus ramificaciones, hasta llegar a las hojas a través de una serie de procesos físicos que forman un mecanismo conocido como tensión-adhesión-cohesión, teoría desarrollada por el científico Henry H. Dixon.

En la Figura 2 [5] se observa el recorrido de la savia bruta desde que es absorbida por los pelos absorbentes hasta que llega al xilema.

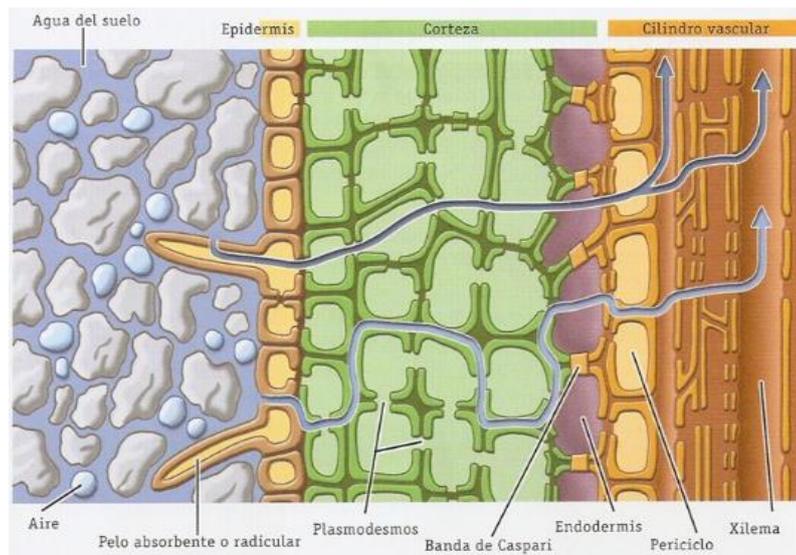


Figura 2: Corte transversal de una raíz

Eso sucedería en caso de que la planta estuviera sana, puesto que recibiría los nutrientes necesarios para su correcto desarrollo. Sin embargo, dependiendo del tipo de suelo se podrían dar situaciones adversas. Por ejemplo, como se muestra en la imagen inferior (Figura 3) [6], un suelo salino afectaría negativamente al crecimiento y desarrollo de las plantas, no podrían absorber la cantidad de nutrientes y agua necesarios sin ser sometidas a lo que se conoce como estrés salino, que en la mayoría de los casos se traduce en la pérdida del cultivo.



Figura 3: Comparativa suelos sano y salino

2.1.2 Tipos de suelo

El parámetro más conocido para clasificar el suelo es el pH, es decir, la actividad de los iones hidrógeno en la solución del suelo. Este parámetro indica qué minerales lo componen (nitrógeno, potasio, azufre, hierro, calcio, magnesio y fósforo, entre otros) y sus excesos y carencias [7]:

- **Suelos ácidos:** Presentan elementos químicos de carácter ácido en mayor proporción. Carecen de calcio y magnesio, y tienen un exceso de hierro y aluminio, y tienen un valor de pH menor que 7 [8].
- **Suelos neutros:** Se caracterizan por tener porcentajes equilibrados de minerales. El valor de pH es de 6,2 a 7.

- Suelos salinos o alcalinos: Tienen un exceso de sales solubles que impiden el desarrollo de los cultivos. Estas sales son cationes de sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), aniones de cloruro (Cl^-), bicarbonato (CO_3H^-), sulfato (SO_4^{2-}) y carbonato (CO_3^{2-}). El pH de este tipo de suelos es elevado [9].

El proyecto se enfocará en los suelos salinos, para que, mediante el control del parámetro que vamos a estudiar, la conductividad eléctrica del suelo, se consiga que dicho suelo tenga las características de un suelo sano (ligeramente ácido).

2.2 Conductividad eléctrica del suelo

En los últimos años se ha estudiado la manera de aumentar la productividad de los cultivos mediante el control de la temperatura, humedad, fertilizantes, oxigenación y cantidad de luz.

La contribución principal en este proyecto es investigar un factor esencial: la conductividad eléctrica del suelo. Una alta conductividad puede interferir en la alimentación de la planta y generar toxicidad y carencias. Por ese motivo, el estado del suelo es clave para el desarrollo del cultivo.

Hay muchos factores que influyen en la nutrición y el crecimiento de las plantas, tanto bióticos como abióticos, incluidas las propiedades físicas y químicas del suelo. Lo que determina la calidad y fertilidad de los suelos agrícolas es el contenido que tienen de sales, ya que estas reducen la permeabilidad de la solución del suelo y, al mismo tiempo, reducen la capacidad de las plantas para absorber agua, incluso cuando el suelo está razonablemente húmedo [10].

La conductividad eléctrica (CE) del suelo mide la capacidad de este para conducir la corriente eléctrica, aprovechando las propiedades de conducción de las sales solubles presentes en él. Un valor elevado de CE indica una alta concentración de sales en el suelo [11].

Las unidades utilizadas para medir la conductividad son dS/m (decisiemens por metro).

La determinación de la conductividad es esencial para tomar decisiones sobre el manejo del cultivo. La CE ayuda a identificar qué cultivos y variedades pueden ser apropiados en función de su tolerancia a la salinidad del terreno.

2.2.1 Efecto de la salinidad en la agricultura.

Como se ha visto, una concentración elevada de sales minerales disueltas afecta a los cultivos negativamente. A continuación, se estudiará cómo afecta en el rendimiento, los síntomas que presentan las plantas y las consecuencias de la salinidad [6].

2.2.1.1 Rendimiento

Con el modelo de Maas y Hoffman se puede estudiar gráficamente la relación entre salinidad y producción de cultivos: el eje X representa la conductividad eléctrica del suelo (dS/m) y el eje Y la producción relativa (%) [11].

La siguiente gráfica (Figura 4), realizada con los datos de Intagri (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura) [10], muestra el rendimiento de tres cultivos distintos: algodón, maíz y fresa.

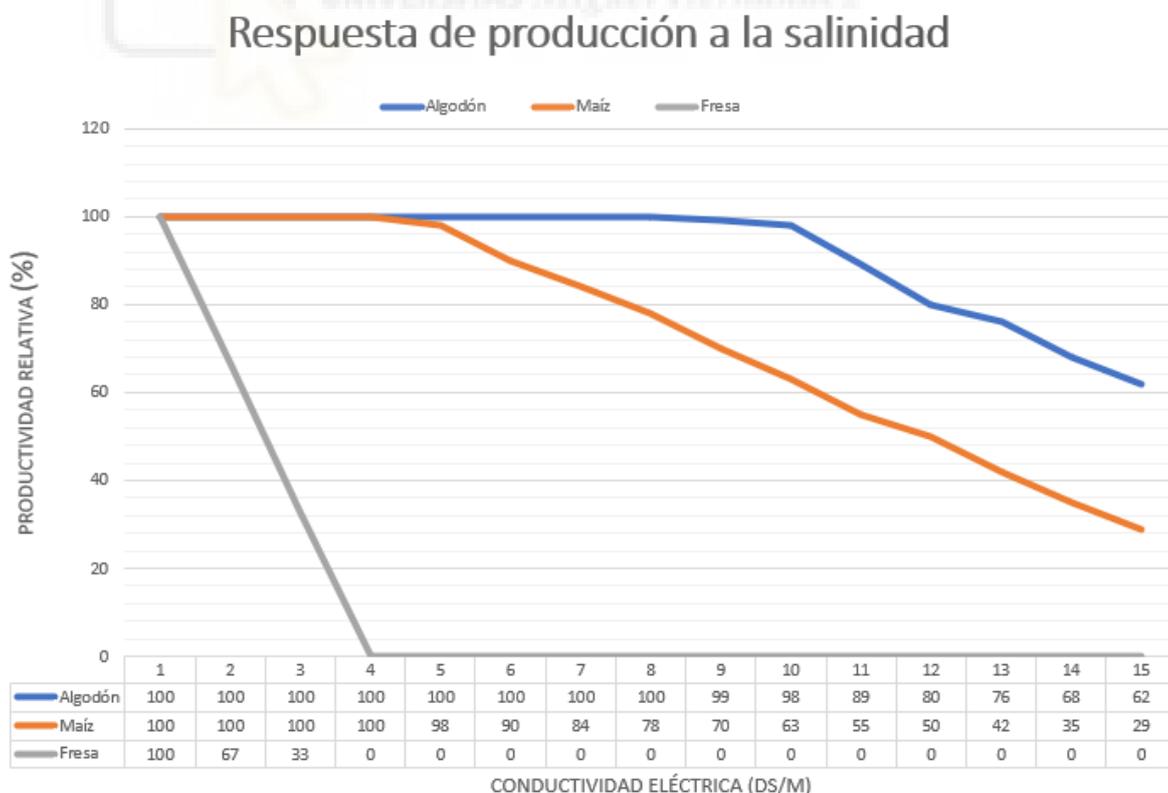


Figura 4: Rendimiento en diferentes cultivos

En la Tabla 1 se recogen los valores más representativos [11]:

CULTIVO	VALOR UMBRAL DE CE	PENDIENTE CE	RENDIMIENTO 50% CE
ALGODÓN	10	10-15	-
MAÍZ	5	5-15	11
FRESA	1	1-4	2,5

Tabla 1: Valores de rendimiento en diferentes cultivos

Valor umbral: Máxima salinidad del suelo que no reduce el rendimiento de la producción [10].

Pendiente: Reducción del rendimiento por unidad de aumento en la conductividad eléctrica por encima del valor umbral [10].

Rendimiento 50%: Indica para qué valor de conductividad el rendimiento se reduce a la mitad [10].

2.2.1.2 Síntomas

Los síntomas varían según las etapas morfológicas de la planta y son más severos en las primeras etapas de crecimiento de la planta, especialmente durante la germinación de la semilla. Otros síntomas que se pueden observar en las plantas debido a las altas concentraciones de sal son el retraso en el crecimiento, quemaduras marginales en las hojas, muerte de las raíces, amarillamiento de las hojas, entre otros síntomas [10].

En las siguientes figuras se aprecian los síntomas mencionados:



Figura 5 [12]: Síntomas efecto salinidad



Figura 6 [12]: Síntomas efecto salinidad



Figura 7 [13]: Síntomas efecto salinidad

2.2.1.3 Consecuencias

Las consecuencias directas de la salinidad en los cultivos son:

- Económicas: En el mejor de los casos el agricultor puede emplear un desplazador de sales, un corrector de suelos salinos, y en el peor caso, la pérdida total del cultivo por intoxicación.
- Salud de las plantas: Como se ha mencionado, un elevado valor de conductividad eléctrica supone una alta toxicidad en los cultivos. Además, el desplazador de sales contiene elementos químicos, que eliminan los organismos beneficiosos presentes en el abono. Uno de ellos es el cloro, y actúa quemando las raíces delicadas evitando que absorban los nutrientes.

2.3 IoT

El Internet de las cosas, conocido por sus siglas en inglés como IoT, es la interconexión de objetos físicos a la red. Permite compartir y recopilar datos con una mínima intervención humana, siendo capaces de registrar, controlar y ajustar cada interacción integrando los dispositivos tecnológicos en el día a día. Gracias al IoT, el mundo físico se encuentra con el mundo digital y cooperan. Esta cooperación se consigue también gracias a otros avances tecnológicos como la conectividad bluetooth, NFC o wifi, las plataformas de computación en la nube, sensores de bajo coste o los asistentes de voz [14].

2.3.1 Arquitectura IoT

En cuanto a la arquitectura de IoT, hoy en día se diferencian siete capas: percepción, conectividad, procesamiento, aplicación, empresarial, seguridad y computación de borde. Las tres últimas capas mencionadas han sido recientemente agregadas debido a los continuos cambios en el entorno de IT (*Information Technology*) [15].

- Capa de percepción: Tiene como función transformar las señales analógicas en digital y viceversa. Algunos ejemplos son los sensores, actuadores, máquinas y dispositivos.
- Capa de conectividad: En ella se transfieren datos desde la nube a dispositivos y viceversa, distintos aspectos de enlace y las redes.
- Capa de procesamiento: Su función es optimizar los datos en todo el sistema controlando y administrando los niveles de IoT.
- Capa de aplicación: Es la responsable de la representación de los datos. El protocolo MQTT, con el que se trabajará en este proyecto, pertenece a esta capa.
- Capa empresarial: Recopila información y realiza un análisis de toma de decisiones a partir de los datos recibidos.
- Capa de seguridad: Se encarga de proteger toda la arquitectura de IoT.
- Capa de computación en el borde: Procesa, analiza y almacena datos acerca de donde se generaron para permitir un análisis y respuestas más eficaces, prácticamente en tiempo real.

2.3.2 Ejemplos IoT

El Internet de las Cosas se considera la cuarta revolución industrial a través de Internet. La tercera revolución industrial nació con la tecnología de la información y su uso para automatizar la producción. Ahora llega la cuarta revolución industrial con la tecnología de internet y su uso en muchos métodos y aplicaciones. La vida de las personas será mucho más inteligente y fácil con el concepto de “en cualquier lugar, en cualquier momento, siempre conectado”.

Las aplicaciones IoT más comunes son [14] [16]:

- Hogar Inteligente (*Smart Home*): Las principales ventajas de tener un hogar conectado a internet son el ahorro de energía, la comodidad y la seguridad.
- Redes Inteligentes (*Smart Grids*): Este concepto incluye medición inteligente, uso eficiente de dispositivos domésticos inteligentes, recursos de energía renovable y recursos de ahorro de energía.
- Dispositivos portátiles (*portable devices*): Cubren los requisitos de fitness, salud y entretenimiento, recopilando datos e información para posteriormente procesarlos y obtener información sobre el usuario.
- Automóviles conectados: Los vehículos podrán mejorar automáticamente su rendimiento gracias a la tecnología de sensores. Los vehículos podrán comunicarse entre sí para evitar accidentes. Los automóviles también pueden conectarse a sensores de estacionamiento para encontrar disponibilidad y ayudar con el estacionamiento de manera adecuada.
- Ciudad inteligente (*Smart City*): Pretende solucionar los principales problemas a los que se enfrentan los residentes urbanos, como la contaminación, el control del tráfico, la escasez de agua y energía, etc.
- Internet Industrial: Hace referencia a los dispositivos enfocados en mejorar la eficiencia de los procesos industriales. Un ejemplo es la optimización de la cadena de suministro, que permite detectar posibles mejoras o indicar problemas que complican las operaciones, haciéndolas ineficaces o poco rentables.

- Agricultura: Uno de los sectores en el que el Internet de las cosas ha crecido muy rápido. Los dispositivos centrados en este sector brindan información sobre el rendimiento de los cultivos, las precipitaciones, la infestación de plagas y los nutrientes del suelo, lo que permite el uso de tecnologías específicas para mejorar su cultivo.

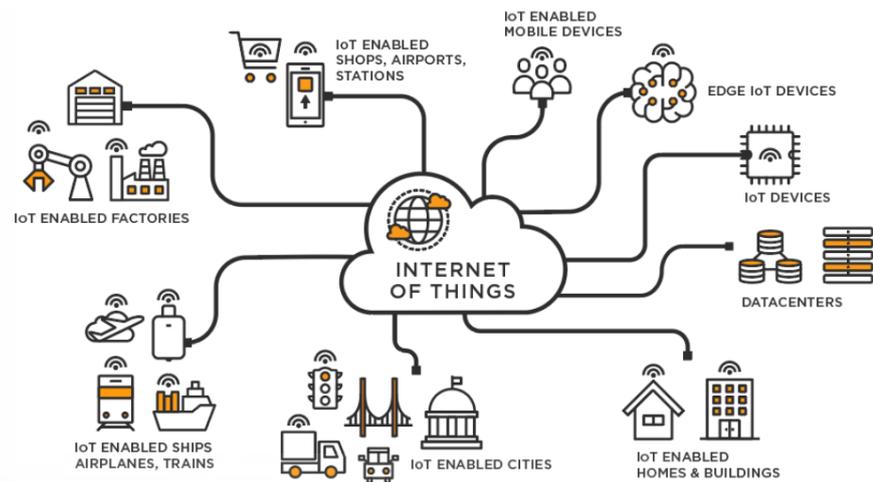


Figura 8 [14]: Aplicaciones IoT

2.3.3 Agricultura 4.0

Las empresas agrícolas hoy en día están llamadas a abordar un tema importante: satisfacer la creciente demanda de alimentos adaptándose al cambio climático, limitando los tratamientos químicos.

Es un desafío global y una parte importante en la agenda de 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU, que estima que el número de la población alcanzará los 9.800 millones en 2050 y los 11.200 millones en 2100, lo que hará que la producción total de los alimentos aumente casi un 70%. Con estos datos las empresas agrícolas deberán ser capaces de producir más alimentos con mayor eficiencia [2].

Para ello, las empresas de este sector deberán utilizar herramientas y estrategias que les permitan utilizar tecnologías avanzadas con el objetivo de hacer la producción más eficiente y sostenible. Hablamos de la Agricultura 4.0.

2.3.3.1 Las tecnologías de la agricultura 4.0 y la gestión de los datos.

Este término hace referencia al uso de las tecnologías más innovadoras y con capacidad de gestionar datos e información para finalmente interpretarlos de forma útil.

Entre las tecnologías 4.0 aplicadas en el ámbito agrícola destacan: IoT, Big Data, Inteligencia artificial, la Nube, drones y sensores [17].

- **Internet de las cosas**: Es la tecnología que permite la conexión y comunicación entre herramientas como drones, sensores y antenas para intercambiar información.
- **Big Data**: Es el conjunto de información y datos generados por las diferentes tecnologías en funcionamiento. Los datos que se reciben suelen ser distintos entre sí puesto que proceden de diversas fuentes y han de ser procesados por la Inteligencia Artificial para dar respuestas concretas.
- **Inteligencia Artificial**: Es la tecnología que instruye a las máquinas con el objetivo de tomar decisiones en tiempo real evaluando situaciones específicas. Los dos ámbitos principales de aplicación son la robótica y los softwares de gestión. El primero persigue automatizar tareas y el segundo reducir las horas de trabajo de los empleados en las tareas repetitivas.
- **Nube**: Es el conjunto de servicios que garantiza el acceso a determinadas tecnologías, datos y recursos compartidos en la red a un gran número de personas.

Gestionar los datos e información es esencial para la eficiencia y optimización de los cultivos, y gracias a las herramientas de las que disponemos hoy en día es posible conseguirlo. En esta investigación se trabajará con la tecnología IoT, interconectando drones, sensores y antenas. A continuación, se explican detenidamente los aspectos más relevantes de estas herramientas:

- **Drones**: Uno de los inventos más revolucionarios de la historia son los drones, que literalmente traducido del inglés significa “zumbido” debido al sonido que emite cuando está volando. Sin embargo, la

palabra dron se emplea para referirse a los UAV, Vehículo Aéreo No tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Su origen se remonta al año 1849 cuando el ejército austriaco lanzó un ataque con 200 globos aerostáticos no tripulados y cargados con explosivos sobre la ciudad de Venecia, puesto que no podían instalar grandes piezas de artillería en las proximidades de la ciudad. Desde ese momento, los UAV se emplearon principalmente con fines militares hasta que en 2014 se aprobó la primera normativa que regulaba los drones en España, siendo de gran ayuda en sectores como topografía, minería, emergencia y seguridad, salvamento, ciencias ambientales, arqueología, sector audiovisual y agricultura, entre otros [18].

En la actualidad, los drones se han convertido en aliados de la agricultura sostenible puesto que están consiguiendo mejoras esenciales en los cultivos, como el aumento de la productividad, disminución del impacto ambiental y la reducción de los costes, gracias a la información que son capaces de recopilar sobrevolando el terreno [19].

Los drones que se emplean en este sector proporcionan diferentes datos según el sensor de la cámara que llevan integrada [20]:

- Dron con cámara termográfica: Permite crear mapas térmicos capturando imágenes térmicas en las que se miden la temperatura de cada píxel. Sus principales aplicaciones son el control del estrés hídrico en los cultivos y el control de la temperatura del terreno.

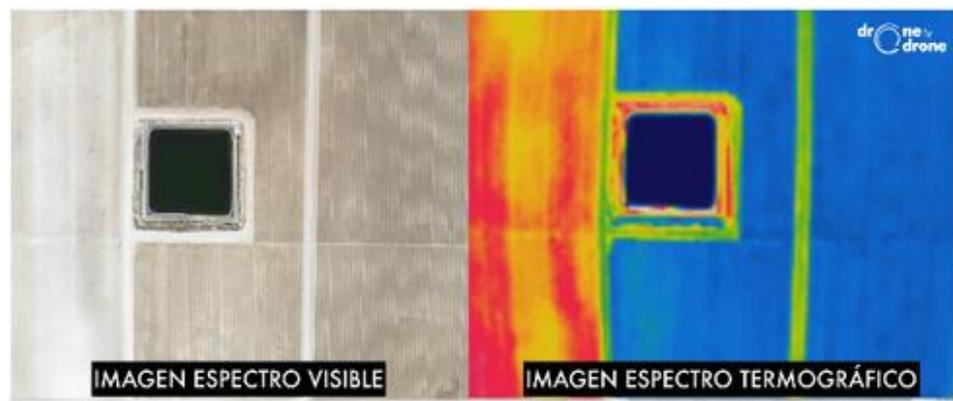


Figura 9 [21]: Vista dron con cámara termográfica

Como se puede observar en la Figura 9, en la izquierda se muestra un campo de hortalizas (junto a una pequeña balsa de agua

cuadrangular) en el espectro visible y en la derecha con la cámara termográfica, donde las temperaturas elevadas están en tonos rojos y las bajas en tonos azulados. Esta diferencia de tono se debe a que las áreas cultivadas (tonos azulados) mantienen su temperatura a pesar de una alta insolación (tonos rojizos).

- Dron con cámara RGB: Mide la cantidad de luz dentro del espectro visible en tres colores primarios: rojo, verde y azul; y el resto de los colores son creados por combinaciones de los tres. Estas cámaras se emplean para la perimetración de daños, topografía y cálculo de volúmenes [22].



Figura 10 [23]: Vista dron con cámara RGB

- Dron con cámara multiespectral: Recopila imágenes en función de la longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético (visible y no visible) y principalmente se emplean para calcular índices de vegetación [24].

El más conocido es el NDVI, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, (*Normalized Difference Vegetación Index*), que mide la relación entre la energía absorbida y emitida por las plantas en las bandas electromagnéticas del color rojo y el infrarrojo cercano. Este índice permite calcular el vigor y el estado metabólico de la planta con la expresión:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Donde “NIR” (*Near Infra Red*) es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano y “RED” es la reflectancia en el canal rojo del visible. A la hora de analizar un terreno, la vegetación sana se mostrará en tonos verdes y la que sufra algún tipo de daño (principalmente estrés por sequía, plagas, etc) en tonos rojos.

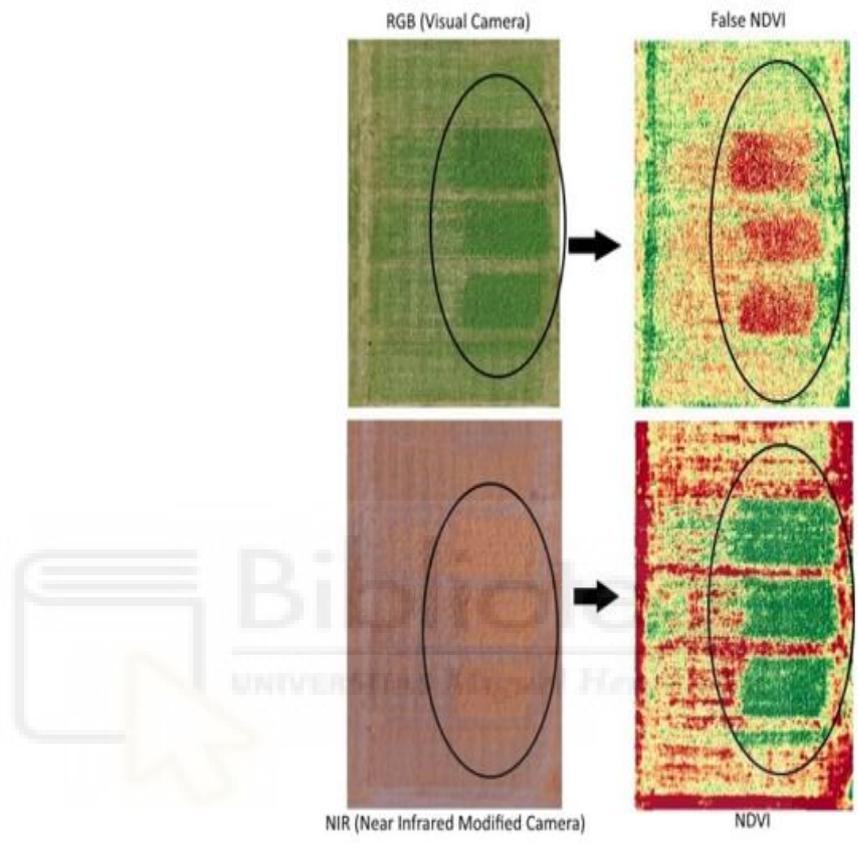


Figura 11 [25]: Vista dron con cámara multispectral

En la Figura 11 hay cuatro imágenes del mismo terreno en la que cada una de ellas tiene la parte más sana del campo marcada con un círculo. Tanto las imágenes RGB como las NIR, muestran correctamente las partes sanas. El RGB puede ser más útil que la imagen NIR porque tiene más sentido puesto que el ojo humano puede ver el espectro visible pero no el NIR. A pesar de ello, la imagen NIR muestra más detalles de estrés que la imagen RGB. Esto se debe a que los cultivos muestran antes el estrés en el NIR que en el espectro visible.

Para que el ojo humano lo capte se convierte la imagen NIR en "NDVI". Como sólo se puede crear una verdadera imagen NDVI a

partir de un sensor NIR, la imagen junto al RGB está etiquetada “False NDVI”, en español, “Falso NDVI” puesto que no es un verdadero NDVI [25].

Son muchos los beneficios que se han obtenido empleando los drones en este sector. Entre ellos destacan [26]:

- ✓ Detección de plagas y malas hierbas: Las plagas que afectan a los cultivos pueden costarle una parte o la totalidad de la cosecha, causando un daño económico significativo. Se pueden detectar con antelación las zonas infectadas de los cultivos y evitar que se propaguen al resto.
- ✓ Fumigación rápida y con mayor precisión: Los drones indican de manera inmediata y precisa dónde actuar. De esta forma, se actúa en una zona determinada y no en el cultivo completo, reduciendo así los costos y aumentando la eficiencia.
- ✓ Estudio de la condición de las plantas y del suelo: Se puede ver si las plantas están sanas y si realizan la fotosíntesis correctamente mediante mapas que muestren la reflectancia de las plantas. Además, proporciona datos sobre la fertilidad del suelo y si hay carencias de nutrientes. De esta manera se pueden reducir costos y aumentar la productividad porque no invierte tanto tiempo como con los métodos tradicionales de inspección visual.
- ✓ Inventario del terreno: En terrenos de miles de hectáreas lleva mucho tiempo realizar un conteo de la plantación. Con drones se consigue un ahorro importante de tiempo y costes.
- **Sensores**: Un sensor es un dispositivo capaz de detectar acciones o estímulos externos y reaccionar en consecuencia.

Estos dispositivos pueden convertir señales físicas en otras de tipo eléctricas:



El origen del primer sensor, uno de temperatura, se remonta al año 1714 y se atribuye a Daniel Gabriel Fahrenheit, pero no fue hasta el año 1969 cuando Honeywell desarrolló el primer sensor inteligente. Desde entonces, han ido evolucionando hasta los dispositivos actuales permitiendo aumentar la calidad, eficiencia y velocidad en muchos sectores [27].

Los sensores de cultivos brindan a los agricultores mediciones rápidas, objetivas, cuantitativas y precisas que son difíciles o imposibles de lograr por otros medios [28].

Desde hace unos años, la Comisión Europea ha apostado por la agricultura de precisión, que requiere la instalación de sensores inteligentes en los cultivos en España. Los datos que se recopilan en la primera fase del ciclo de la Agricultura 4.0 se convierten en información relevante (segunda fase) para ayudar a los agricultores a tomar decisiones (tercera fase) [29].

Existen muchos tipos de sensores que ayudan a mejorar la productividad en la agricultura. Algunos de ellos son:

- Sensores de suelo: Controlan las necesidades nutricionales de los cultivos, automatizan procesos, alertan y previenen de heladas y plagas. Los parámetros que miden son la humedad, temperatura y conductividad eléctrica de la tierra [30].



Figura 12 [31]: Sensor de suelo



Figura 13 [31]: Implementación sensor

- Sensores de clima: El clima es la variable más importante que influye en las plantas y el ambiente en el que crecen. Estos sensores miden la temperatura y humedad ambiental, presión atmosférica y de vapor.



Figura 14 [32]: Sensor de clima



Figura 15 [34]: Aplicación sensor

- Sensores de control del agua: Son capaces de medir el nivel de acidez (ph) y la calidad y salinidad del agua de regadío (conductividad en agua) [35].



Figura 16: Sensor de control de agua



Figura 17: Implementación sensor

Anteriormente se han comentado los beneficios de trabajar con drones en la agricultura, sin embargo, los sensores juegan un papel importante debido a que son capaces de recopilar información en tiempo real y transmitirla inalámbricamente a un centro de control. De los tres tipos de sensores mencionados, el más efectivo para la investigación es el sensor de suelo, puesto que al estar en contacto directo con el terreno proporciona información que el ojo humano es incapaz de percibir. Con los datos que reciben se crean modelos de predicción que permiten a los agricultores actuar proactivamente.

- **Antenas:** Una antena es cualquier conductor eléctrico cuyo tamaño y forma le permitan transmitir ondas electromagnéticas al espacio y captar ondas electromagnéticas y convertirlas en un voltaje en sus bornes. Su principal función es irradiar la potencia con las características direccionales requeridas por la aplicación (radiodifusión, comunicaciones por satélite comunicaciones móviles, GPS...) [36].

La antena cuando recibe la información realiza un procedimiento de cuantización y decodificación para que la información sea legible en dispositivos, por ejemplo, en ordenadores. En el proyecto, para simplificar, se supondrá que la información que difunde el dron se procesa y lee en la antena.

Capítulo 3. Herramientas e instalación

En este capítulo se exponen el protocolo, software y emulador empleados para la realización del proyecto.

3.1 MQTT

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) es un protocolo de mensajería estándar de OASIS (*Organization for the Advancement of Structured Information Standard*) para Internet de las cosas (*IoT*). Es un protocolo de comunicación diseñado para el transporte de mensajería de publicación/suscripción extremadamente ligera (poco consumo) que conecta dispositivos remotos con un espacio de código pequeño y un ancho de banda de red mínimo. Hoy en día se utiliza en una amplia variedad de industrias, como la automotriz, la manufactura, las telecomunicaciones, el petróleo y el gas, etc [37].

Este protocolo fue inventado en 1999 por Andy Stanford-Clark (IBM) y Arlen Nipper (Arcom, ahora Cirrus Link), puesto que necesitaban un protocolo para un consumo mínimo de batería y ancho de banda para conectarse con los oleoductos vía satélite.

3.1.1 Estructura mensaje MQTT

Los mensajes de este protocolo constan de una cabecera fija, una cabecera variable (opcional), y la carga útil de mensaje (opcional) que esta compuesta por el mensaje y la calidad de servicio, *quality of service (QoS)*:

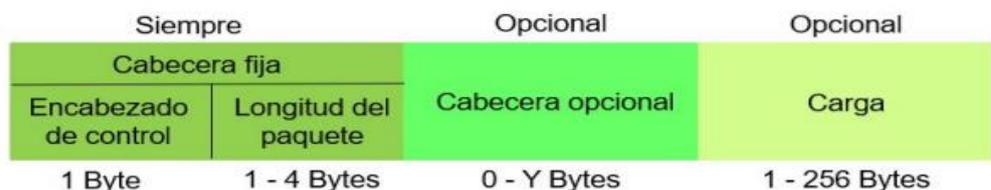


Figura 18: Estructura mensaje MQTT

3.1.2 ¿Por qué trabajar con este protocolo?

Dado que MQTT es un protocolo de código abierto que se ejecuta sobre TCP/IP, es más sencillo lograr que diferentes dispositivos, incluso utilizando diferentes lenguajes de programación, envíen y reciban mensajes sin

problemas debido a la conectividad, redirección o incompatibilidad. Entre las características de este protocolo destacan las siguientes [38]:

- Ligero y eficiente: Los recursos son mínimos, por lo que pueden emplearse en microcontroladores. Además, para optimizar el ancho de banda los encabezados de este protocolo son pequeños.
- Comunicación bidireccional: Los mensajes se envían del dispositivo a la nube y viceversa.
- Escalabilidad: Permite conectarse con varios dispositivos IoT.
- Seguridad: Este protocolo facilita el cifrado de mensajes con TLS y también la autenticación de clientes.
- Entrega de mensajes confiable: MQTT tiene 3 niveles de calidad de servicio definidos (QoS):
 - QoS 0: Como máximo una vez. En este nivel de servicio el mensaje se envía solo una vez y no garantiza la entrega. Además, el mensaje puede perderse si el cliente se desconecta o si falla el servidor.
 - QoS 1: Al menos una vez. El mensaje siempre se entrega, como mínimo, una vez. En caso de que el emisor no reciba un justificante de que el mensaje le llega al receptor, el mensaje se enviará de nuevo. En consecuencia, al receptor le pueden llegar mensajes duplicados.
 - QoS 2: Exactamente una vez. Es la modalidad de transferencia más segura, pero la más lenta. Garantiza que el mensaje llegue una sola vez al receptor.

3.1.3 Arquitectura de publicación/suscripción de MQTT

Este protocolo requiere varios elementos para su funcionamiento [38]:

- Publicador: Actúa como cliente y es el responsable de transmitir información al bróker sobre un tema/topic en particular.
- Bróker: Actúa como servidor. Es el intermediario y gestiona los clientes que están publicando/suscribiéndose a los temas/topics. Cuando le llega información del publicador se encarga de difundirla.
- Suscriptor: Actúa como cliente y son los elementos que reciben la información del bróker sobre un determinado tema/topic.

- **Mensaje:** Información que se transmite/recibe sobre un topic.
- **Topic:** Es el tema en el que los clientes se suscriben para recibir o publicar información.

Por ejemplo, como se observa en la Figura 19, el sensor de temperatura (publicador) quiere enviar un mensaje diciendo que la temperatura es 24°C. Para ello, con el topic “temperatura”, envía la información al bróker y los suscriptores (cualquier dispositivo), que en este caso están suscritos al mismo tema, reciben el mensaje.

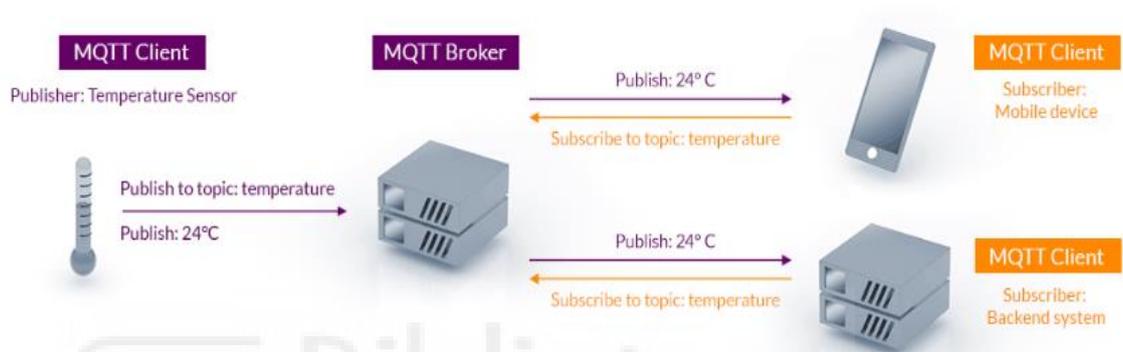


Figura 19: Ejemplo protocolo MQTT

En el proyecto, para establecer comunicación entre los tres roles mencionados, es necesario introducir la herramienta Mosquitto.

3.2 Mosquitto

Es un software de código abierto que implementa varias versiones del protocolo MQTT y que dotará a las estaciones la capacidad de ser un bróker. Para ello, se emplearán distintos comandos en función del rol.

En primer lugar, el bróker (el servidor) se inicializa con el comando “mosquitto -d”.

Después, publicador y suscriptor (clientes), pueden completar el comando con alguno de los siguientes indicadores:

INDICADOR	DESCRIPCIÓN
-h	Dirección ip del bróker
-t	Tema suscrito
-P	Contraseña

-u	Usuario
-q	Nivel QoS
-m	Mensaje

Tabla 2: Comandos protocolo MQTT

El último indicador, mensaje, solo lo utiliza el publicador.

Tomando de referencia el ejemplo anterior (sensor de temperatura), simplemente añadimos que el bróker tiene la dirección ip 10.0.0.2. Por tanto, los comandos a introducir son:

ELEMENTO	COMANDO
PUBLICADOR	mosquitto_pub -h 10.0.0.2 -t temperatura -q 0 -m 24°C
BRÓKER	mosquitto -d
SUSCRIPTOR	mosquitto_sub -h 10.0.0.2 -t temperatura -q 0

Tabla 3: Ejemplo protocolo MQTT

3.3 Mininet

Mininet es un emulador de red que ejecuta una colección de hosts finales, switches, routers y enlaces en un único núcleo en Linux. Utiliza una virtualización ligera para que un solo sistema parezca una red completa, ejecutando el mismo núcleo, sistema y código de usuario. Un host Mininet se comporta como una máquina real. Puede conectarse a él mediante ssh (si inicia sshd y hace un puente con la red de su host) y ejecutar programas arbitrarios (incluyendo cualquier cosa que esté instalada en el sistema Linux subyacente) [39].

3.3.1 Características Mininet

Las características fundamentales del emulador son [40]:

- Proyecto de código abierto: El código puede ser revisado y modificado de forma gratuita.
- Simple: Instalarlo y comenzar a trabajar con el diagrama de red es inmediato e intuitivo.
- Software ligero: No requiere muchos recursos a la hora de ejecutarse ya que lo puede hacer en un servidor, máquina virtual o en la nube.
- Facilidad de uso: utilizando scripts de Python, es posible crear y ejecutar varias pruebas de Mininet.
- Escala redes virtuales: Permite emular escenarios con grandes redes virtuales en los que se pueden controlar todos los dispositivos que la componen.
- Comportamiento de los elementos: los enrutadores, switches o servidores pueden controlarse de forma independiente y su comportamiento es igual que los reales.

3.4 Mininet-wifi

Mininet-wifi es una variante de Mininet que amplió la funcionalidad del emulador añadiendo estaciones Wifi y puntos de acceso virtualizados: las estaciones son dispositivos que se conectan a un punto de acceso a través de autenticación y asociación; y los puntos de acceso se encargan de gestionarlas. También se agregaron atributos como posición relativa y movimiento de estaciones móviles y puntos de acceso [41].

El código fuente de mininet-wifi es un repositorio Git disponible públicamente en github. Git es un sistema de código abierto, capaz de gestionar el control de versiones de cualquier proyecto, en este caso el de mininet-wifi.

Con el objetivo de facilitar la búsqueda y el seguimiento de los proyectos gestionados por Git, los desarrolladores comparten su repositorio Git en Github, una plataforma para crear, gestionar, seguir distribuyendo e interactuar con proyectos de código abierto.

3.5 Miniedit

MiniEdit es un editor gráfico para Mininet, que puede crear y ejecutar muchas simulaciones de red, así como configurar los elementos de esta red y guardar la topología.

Para ejecutarlo, es necesario cerrar las simulaciones y finalizar los procesos anteriores. Después, desde un terminal se arranca el entorno de trabajo con los comandos:

```
cd mininet-wifi  
  
cd mininet  
  
cd examples  
  
./miniedit.py
```



Figura 20: Ventana gráfica MiniEdit

La interfaz cuenta con una zona de trabajo y una fila de herramientas que permiten configurar las redes. Estos elementos son, en orden de apariencia:

- Select: Se utiliza para mover los nodos dentro de la interfaz.
- Host: Permite agregar elementos Host o terminales en el editor gráfico. La palabra *Host* significa “anfitrión” y en este contexto, hace referencia a los dispositivos conectados a una red.
- Station: Son dispositivos que se conectan a un punto de acceso mediante autenticación y asociación. En nuestra implementación, cada estación tiene una

tarjeta inalámbrica (staX-wlan0 - donde X se sustituirá por el número de cada estación). Como los hosts tradicionales de Mininet están conectados a un punto de acceso las estaciones son capaces de comunicarse con esos hosts.

- Switch: Dispositivo con capacidad de gestión estándar y que permite transmitir información. Se configura de la misma manera que el Host.
- Puntos de acceso: Son dispositivos que gestionan las estaciones asociadas. Se virtualizan a través del demonio hostapd y utilizan interfaces inalámbricas virtuales para el punto de acceso y los servidores de autenticación. Aunque los puntos de acceso virtualizados no tienen todavía APIs que permitan a los usuarios configurar varios parámetros de la misma de uno real, la implementación actual cubre las características más importantes, por ejemplo, ssid, canal, modo, contraseña, criptografía, etc.
- Conmutador tradicional: Crea un conmutador Ethernet que funciona independientemente del controlador.
- Router tradicional: Crea enrutadores que, al igual que el elemento anterior, funcionan de manera independiente del controlador. Son Hosts con la IP Forwarding (reenvío de IP) habilitada.
- Enlaces: Permite enlazar los nodos.
- Controlador: Crea un controlador, que por defecto es uno Openflow. Además, puede implementar otro tipo de controlador modificando las propiedades desde el menú desplegable.
- Ejecutar/parar: Inicia y detiene la simulación.

3.6 Instalación herramientas

Antes de finalizar el capítulo, se explicará el procedimiento de instalación:

En primer lugar, se introduce el comando con el que se instalarán los núcleos para Mininet:

```
sudo apt-get install mininet
```

Después, se instala Git para que Mininet se pueda descargar desde Github y crear una estructura de archivos en nuestra máquina:

```
sudo git clone git://github.com/mininet/mininet
```

Con los comandos anteriores se descarga Mininet, y para obtener el código fuente de Mininet-Wifi e instalarlo, se lleva a cabo un proceso llamado clonación en el que se descargará toda la información de un proyecto. Los comandos son:

```
sudo apt-get update
sudo apt install python3
sudo apt-get install git
sudo apt-get install git make
git clone https://github.com/intrig-unicamp/mininet-wifi
```

Por último, se instalan el servidor de Mosquitto, su cliente y la librería de Python con los comandos:

```
sudo apt-add-repository ppa:mosquitto-dev/mosquitto-ppa
sudo apt-get update
sudo apt install mosquitto
sudo apt install mosquitto-clients
sudo apt install python-pip
pip install paho-mqtt
```

3.7 Trabajando con el emulador

Antes de finalizar el capítulo, en este apartado se explican las tres maneras de trabajar con el emulador Mininet-wifi.

3.7.1 Desde línea de comandos

Una opción sencilla para crear topologías en Mininet-wifi, es hacerlo mediante comandos desde un terminal. Los dos tipos de topologías que se pueden crear se denominan *simples* y *lineales*. Para generarlas, es necesario cerrar Mininet-wifi [42].

3.7.1.1 Topología simple

Consiste en 1 punto de acceso, ap1, y n estaciones asociadas a él.

Por ejemplo, con el siguiente comando se creará una topología compuesta por 4 estaciones, 1 punto de acceso y 1 controlador:

```
sudo mn --wifi --topo single, 4
```

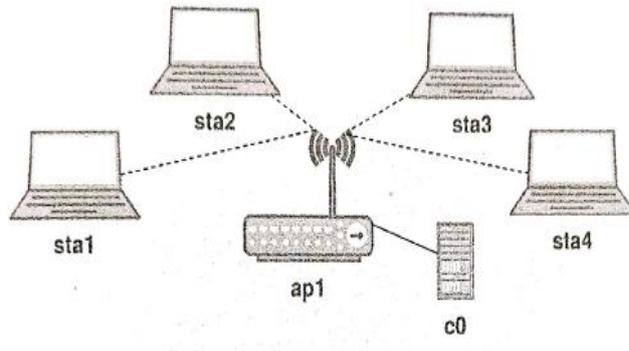


Figura 21: Topología simple

3.7.1.2 Topología lineal

Otra topología que se puede crear mediante comandos es la lineal, que consiste en n puntos de acceso y todos los puntos de acceso están conectados de forma lineal.

En este caso, para crear una topología con 4 puntos de acceso, 4 estaciones y 1 controlador se empleará el comando:

```
sudo mn --wifi --topo linear,4
```

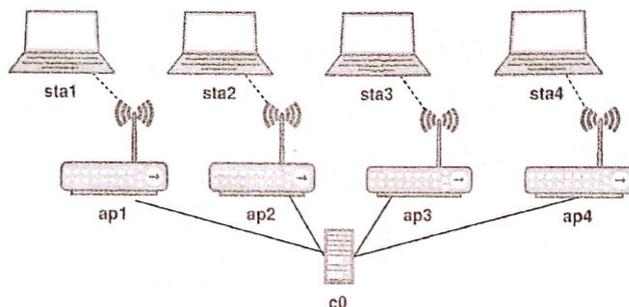


Figura 22: Topología lineal

3.7.2 Miniedit

Una alternativa para crear topologías con soporte gráfico es Miniedit. Escrito en Python, miniedit fue inicialmente desarrollado para Mininet y ha sido constantemente actualizado para trabajar con Mininet-wifi. El objetivo de los desarrolladores de miniedit es hacer que todas las características soportadas por mininet-wifi estén disponibles en miniedit.

Además, como se ha mencionado anteriormente, miniedit tiene una interfaz de usuario bastante sencilla que presenta una pantalla con una línea de iconos de herramientas en la parte izquierda de la ventana y una barra de menús en la parte superior. Viene ya incluida en el código fuente de Mininet-wifi.

Para utilizarlo, simplemente hay que introducir el siguiente comando:

```
sudo python examples/miniedit.py
```

A continuación, se diseña una topología similar a la del apartado 3.7.1.1:

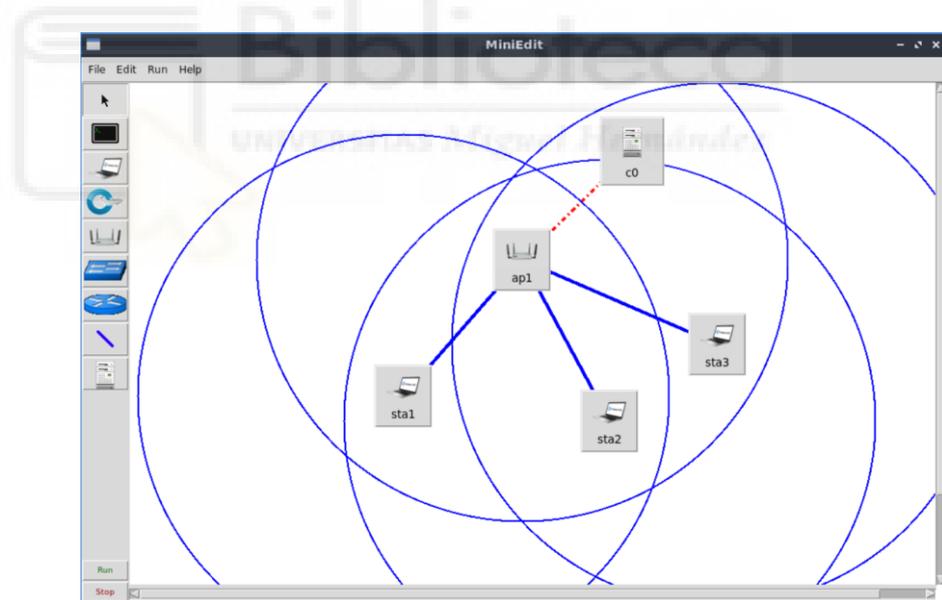


Figura 23: Ejemplo MiniEdit

Una vez se guarda el script, se ejecuta desde la línea de comandos (Figura 24) y se abre una ventana en modo gráfico (Figura 25):

```
wifi@wifi-virtualbo...ininet-wifi/custom - [x] x
wifi@wifi-virtualbox:~/mininet-wifi/custom$ sudo python minieditej.py
*** Adding controller
*** Add switches/APs
*** Add hosts/stations
*** Configuring Propagation Model
*** Configuring wifi nodes
*** Connecting to wmediumd server /var/run/wmediumd.sock
*** Add links
*** Starting network
*** Starting controllers
*** Starting switches/APs
*** Post configure nodes
*** Starting CLI:
mininet-wifi> xterm sta1 sta2 sta3
mininet-wifi> |
```

Figura 24: Ejecución ejemplo de Miniedit

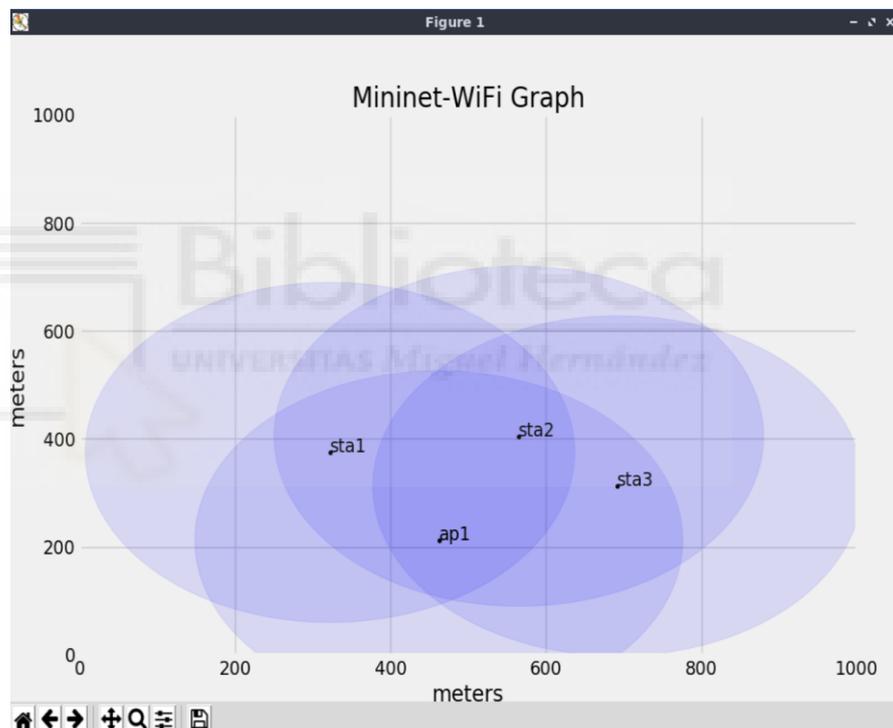


Figura 25: Gráfico del ejemplo MiniEdit

3.7.3 Script en Python

La última forma de emular en Mininet-Wifi es mediante un script en Python: Se importan las librerías necesarias, se programa el código y se ejecuta. Cuando se instala Mininet-Wifi, se descargan varios archivos de Git que contienen scripts básicos con los que se pueden realizar pruebas. Para acceder a ellos, se introducen los siguientes comandos desde un terminal:

```
cd mininet-wifi/examples/
```

Una vez en el directorio, el comando “ls” enumera su contenido:

```
wifi@wifi-virtualbox:~/mininet-wifi/examples - [X] x
wifi@wifi-virtualbox:~/mininet-wifi$ cd examples/
wifi@wifi-virtualbox:~/mininet-wifi/examples$ ls
4address.py          __init__.py          socket_client.py
6GHz.py              meshAP.py            socket_server.py
6LoWPan.py           mesh.py              sta_ap_node.py
active_scan.py        miniedit.py          telemetry.py
adhoc.py              mobilityModel.py     uav
associationControl.py mobility.py            userap_managed_mode.py
authentication.py     multipleWlan.py      vanet.py
battery.py            p4                    vanet-sumo.py
clustercli.py         physicalMesh.py      wifiDirect.py
cluster.py            physicalWifiDirect.py wmediumd_error_prob.py
coherenceModel.py    position.py           wmediumd_interference.py
eap-tls               propagationModel.py  wmediumd_mobility.py
forwardingBySSID.py  radius                wps_auth.py
handover_bgscan.py   replaying             wlan.py
handover.py           sflow.py
ieee80211p.py        simplewifitopology.py
wifi@wifi-virtualbox:~/mininet-wifi/examples$
```

Figura 26: Contenido directorio examples

Ejecutamos, por ejemplo, el script “mobility.py”, un código que fija la posición de los nodos y proporciona movilidad. El comando empleado es:

```
sudo python mobility.py
```

Finalmente se abre el gráfico de Mininet-wifi:

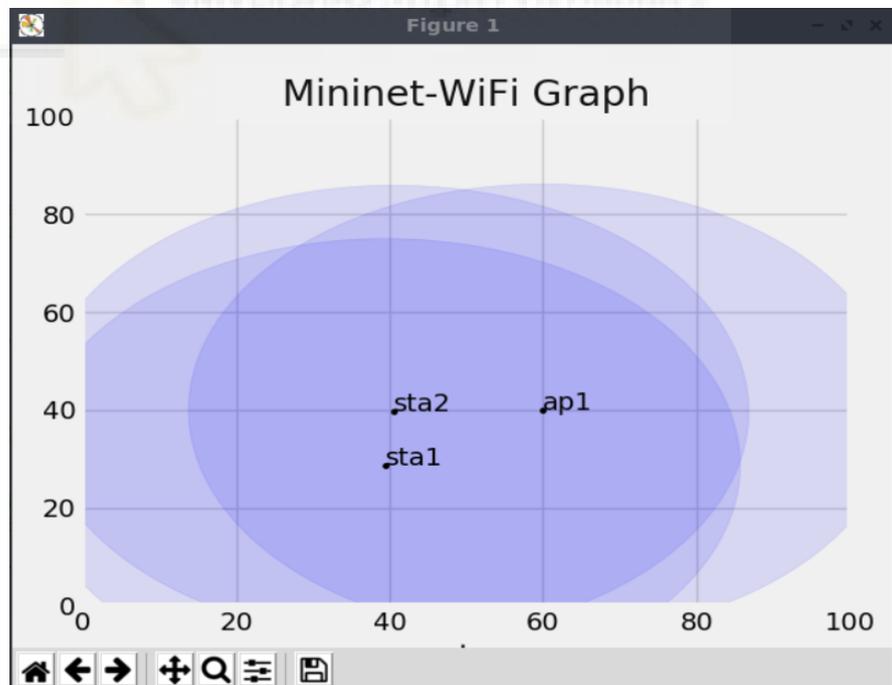


Figura 27: Gráfico Mininet-Wifi script mobility.py

Capítulo 4. Implementación práctica

Con los avances de IoT, se pueden emular situaciones de la vida real en entornos virtuales.

Con este trabajo se pretende dar solución a una situación concreta que se puede plantear en la vida diaria de un agricultor: Análisis de una zona concreta de un cultivo una vez detectadas deficiencias en la producción.

Centramos el estudio en el cultivo del aguacate, fruto tropical que se está cultivando desde hace pocos años en España, y por sus requerimientos edáficos y climatológicos (temperaturas estables, elevada humedad y textura del suelo, entre otros), uno de los mejores lugares para su plantación es la Comunidad Valenciana.

A pesar de que los árboles de este fruto requieran un suelo de pH 5,5 – 7 para que puedan tomar forma óptima sus nutrientes, los suelos donde se cultivan en España son salinos. Las zonas de la Comunidad Valenciana donde se cultivan aguacates son áreas donde, según el RIESGOSIVIA y CIDE (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias y Centro de Investigaciones sobre Desertificación, respectivamente) la conductividad eléctrica es de 0,5-2, por lo que hay que tener especial cuidado ya que el aguacate tiene una tolerancia a la salinidad de 1,2 dS/m [43].

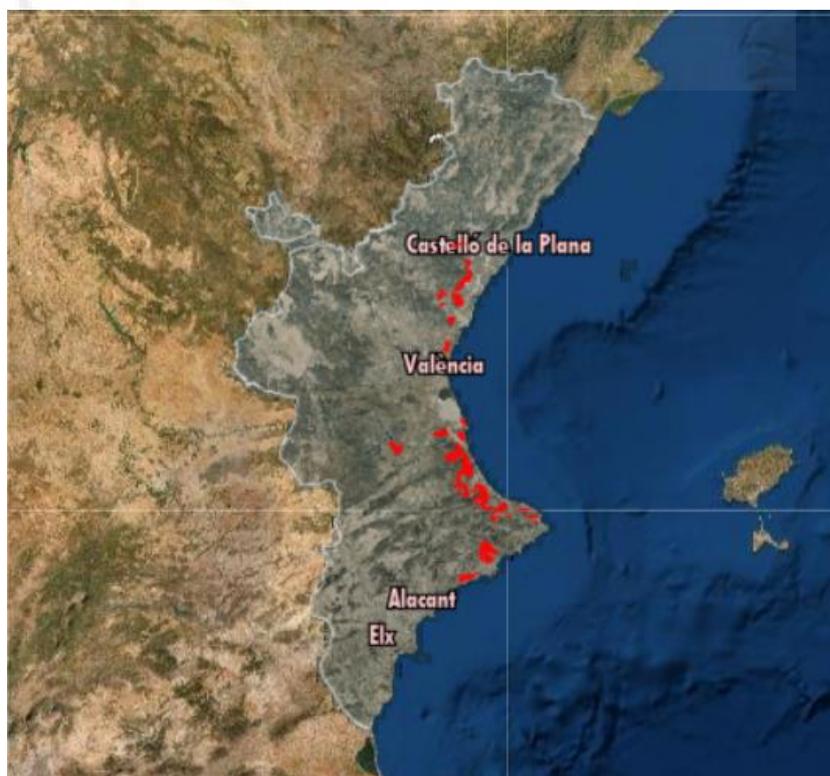


Figura 28 [46]: Cartografía cultivo de aguacates en la Comunidad Valenciana

En los mapas adjuntos se muestran el riesgo de salinidad del suelo (Figura 29) y la conductividad eléctrica del suelo (Figura 30) en la Comunidad Valenciana [44].

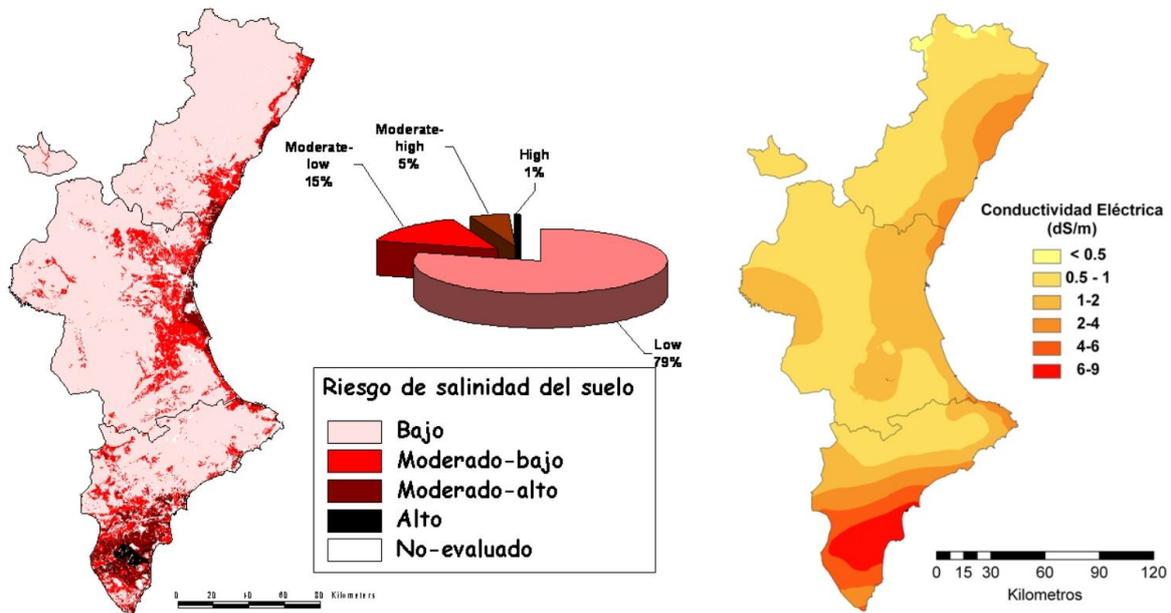


Figura 29: Riesgo salinidad del suelo

Figura 30: Conductividad Eléctrica

Para garantizar un rendimiento elevado del cultivo en estas zonas, con Mininet-wifi se emulará el siguiente escenario:

1. Se importan los paquetes y las librerías necesarias y se define la topología.
2. Se definen tres variables: ancho, largo y separación. Las dos primeras indican las dimensiones del campo y la tercera la separación entre los cultivos.
3. Se definen los sensores, dron y antena de la siguiente manera:
 - Sensores: Se hace un bucle *for* para crear las estaciones en función de las tres variables anteriores. A cada estación se le asigna un nombre, direcciones *mac* e *ip*, la posición y un valor aleatorio de conductividad.
 - Dron: Se le asigna direcciones *mac* e *ip*. Como el dron va a estar en movimiento, se define un modelo de movilidad para que se mueva aleatoriamente por el gráfico.
 - Antena: Se asignan direcciones *mac* e *ip* y posición fija.
4. Se definen el Access Point (ap1) que dará cobertura al área y el Controlador (c1).
5. Se inicia el protocolo mqtt:
 - El dron, con el comando 'mosquitto -d' indica que es el bróker, es decir, el que va a difundir la información que le llegue del publicador.

- La antena se define como suscriptor. Le llegarán los datos que publiquen los sensores y se podrán ver en una ventana.
- El sensor se configura como publicador. Recogerá los valores de conductividad y los que sean superiores a 1.2, mandará una señal de alerta.

El código es el siguiente:

```
import os

import sys

import numpy as np

from time import sleep

import random

from random import *

from mininet.log import setLogLevel, info

from mn_wifi.cli import CLI

from mn_wifi.net import Mininet_wifi

from mininet.net import Mininet

from mininet.term import makeTerm

from mininet.net import Controller

from mn_wifi.node import OVSKernelAP

from mn_wifi.net import Mininet_wifi

from mininet.link import TClk

from mininet.cli import CLI

import matplotlib.pyplot as plt

def topology(args):

    "create a network"

    net = mininet_wifi(accessPoint=OVSKernelAP)

    ancho = 100
```

```

largo = 100
separacion = 25
n = 1
for x in range(10, ancho-10, separacion+1):
    for y in range (10, largo-10, separacion+1):
        print(f'{x}{y}')
        net.addstation('s%d'%n, mac='00:00:00:00:00:%d' % (n +
11), ip= '10.0.0.%d/8' % (n + 11), position='%d,%d,0' %
(x,y), conductividad='%f' % uniform(0.5,2))
        n = n+1
dron=net.addstation('dron', mac='00:00:00:00:00:10', ip=
'10.0.0.10/8')
antena=net.addstation('antena', mac='00:00:00:00:00:11',
ip='10.0.0.11/8', position= '20,70,0')
ap1 = net.addaccesspoint('ap1', ssid='new-ssid', model='di524',
mode='g', channel='1', position='50,50,0')
c1 = net.addcontroller('c1')
info("*** configuring wifi nodes\n")
net.configurewifinodes()
if '-p' not in args:
    net.plotgraph(max_x= ancho, max_y=largo)
net.setmobilitymodel(time=0, model='randomwaypoint', max_x=ancho,
max_y=largo, min_v=0.5, max_v=3, seed=20)
info("***starting network\n")
net.build()
c1.start()
ap1.start([c1])
info("*** abriendo terminales")
dron.cmd('mosquitto -d')

```

```

maketerm(antena, title='antena', cmd='mosquitto_sub -h 10.0.0.10 -t
conductividad -q 0')

print(f 'waiting...')

sleep(20)

while true:

    img=plt.imread("terreno.png")
    plt.imshow(img, extent=[0, alto, 0, ancho])
    plt.xlim([0, alto])
    plt.ylim([0, ancho])
    for sensor in net.stations:

        print(f 'station: {sensor.name}')

        if (sensor.name != 'dron' and sensor.name != 'antena'):

            conductividad=uniform(0.5,2)
            if(conductividad >1.5):

                sensor.cmd('mosquitto_pub -h 10.0.0.10 -t conducti-
vidad -q 0 -m \"%s conductividad = %f - - - > ¡alerta!\"'
% (sensor.name, conductividad ))

            else:

                sensor.cmd('mosquitto_pub -h 10.0.0.10 -t conducti-
vidad -q 0 -m \"%s conductividad = %f' % (sensor.name,
conductividad ))

    info("**** running cli\n")

    (net)

    info("****stopping network\n")

    net.stop()

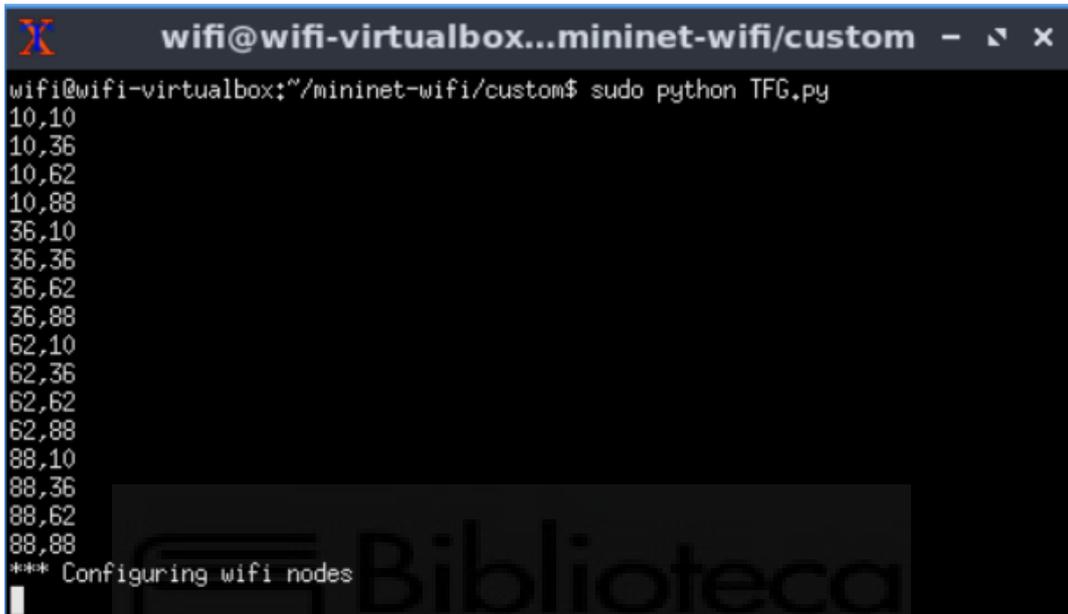
if __name__== '__main__':

    setloglevel('info')

    topology(sys.argv)

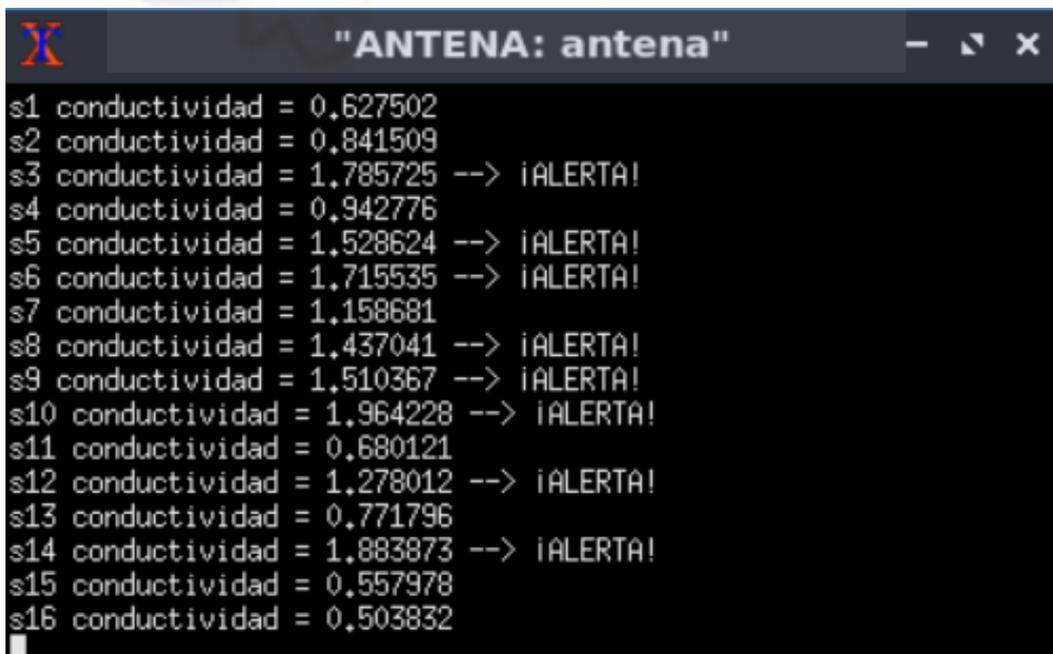
```

En este caso, se ha emulado un cultivo de 1 hectárea (100m*100m) con separación entre plantas de 25m. Al ejecutar el código, aparecen tres ventanas: la primera, con las coordenadas en las que se localizan los sensores, Figura 31; la segunda, una ventana en la que aparece el valor de conductividad eléctrica del suelo en el que se encuentra cada planta, Figura 32; la tercera, el gráfico, figura 33:



```
wifi@wifi-virtualbox...mininet-wifi/custom - [v] x
wifi@wifi-virtualbox:~/mininet-wifi/custom$ sudo python TFG.py
10,10
10,36
10,62
10,88
36,10
36,36
36,62
36,88
62,10
62,36
62,62
62,88
88,10
88,36
88,62
88,88
*** Configuring wifi nodes
```

Figura 31: Posiciones sensores



```
"ANTENA: antena" - [v] x
s1 conductividad = 0.627502
s2 conductividad = 0.841509
s3 conductividad = 1.785725 --> ¡ALERTA!
s4 conductividad = 0.942776
s5 conductividad = 1.528624 --> ¡ALERTA!
s6 conductividad = 1.715535 --> ¡ALERTA!
s7 conductividad = 1.158681
s8 conductividad = 1.437041 --> ¡ALERTA!
s9 conductividad = 1.510367 --> ¡ALERTA!
s10 conductividad = 1.964228 --> ¡ALERTA!
s11 conductividad = 0.680121
s12 conductividad = 1.278012 --> ¡ALERTA!
s13 conductividad = 0.771796
s14 conductividad = 1.883873 --> ¡ALERTA!
s15 conductividad = 0.557978
s16 conductividad = 0.503832
```

Figura 32: Valores CE del suelo del cultivo

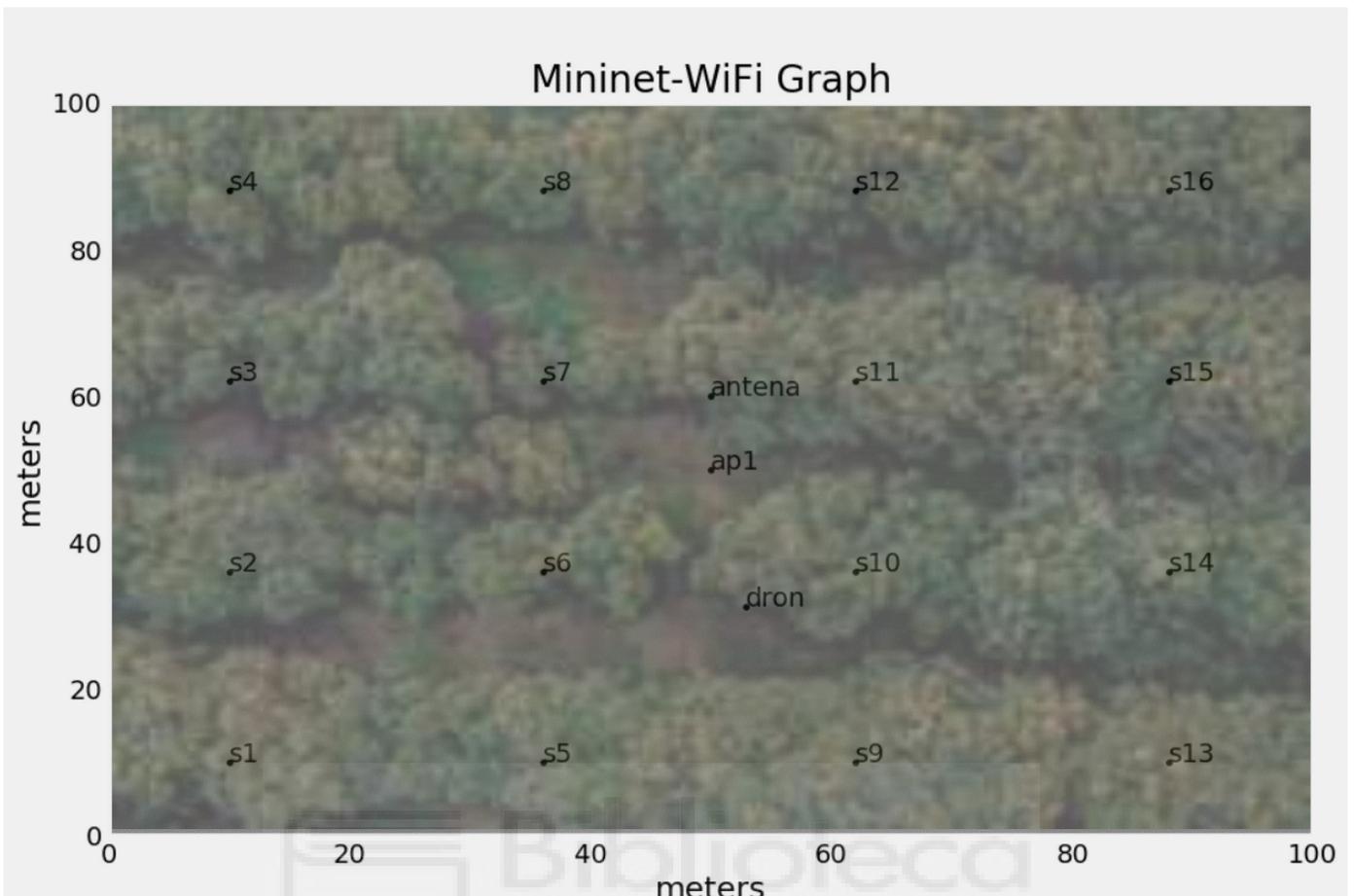


Figura 33: Gráfico Mininet-Wifi cultivo

En la Figura 32, se observan los valores recogidos por los sensores en las zonas donde se han plantado aguacates:

- Los sensores s1, s2, s4, s7, s11, s13, s15 y s16 representan valores normales para el cultivo, es decir, la CE del suelo en esas zonas es inferior a 1,2 dS/m. Esto significa que el rendimiento es del 100%.
- Los sensores s3, s5, s6, s8, s9, s10 y s14 representan valores intolerantes para el cultivo, y en consecuencia el rendimiento disminuye.

En la segunda situación, una rápida intervención del agricultor podría prevenir la pérdida del cultivo en esas zonas y recuperar el 100% del rendimiento.



Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se comentarán las conclusiones y se propondrán líneas futuras a raíz de los resultados obtenidos.

Esta investigación se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la importancia de las competencias transversales a la hora de resolver diferentes situaciones [47]:

- Conocimiento de problemas contemporáneos: Cultivos afectados por exceso de salinidad en el suelo y el incremento de costes que supone para el agricultor.
- Análisis y resolución de problemas: Estudio de la conductividad eléctrica del suelo y cómo afecta en la absorción y circulación de nutrientes de las plantas.
- Innovación, creatividad y emprendimiento: Programación de un código que envía una alerta que indica en qué zona concreta del cultivo hay que actuar para garantizar el mayor rendimiento posible.
- Instrumental específico: Uso de IoT (drones, sensores, antenas y protocolos de comunicación).

5.1 Conclusiones

El objetivo de estudio de este Trabajo Fin de Grado es contribuir al cumplimiento de uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU de su Agenda 2030, concretamente el número 15, “Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad”. [1]

Para ello, analizando la conductividad eléctrica del suelo y aplicando conocimientos de la ingeniería (IoT, programación, protocolos, etc), se ha conseguido crear un programa que pone en alerta al agricultor para que pueda actuar sobre una zona del cultivo afectada por un exceso de salinidad del suelo y, en consecuencia, evitar costes innecesarios.

Se ha analizado el cultivo de aguacates en la zona de la Comunidad Valenciana y se ha realizado una emulación de su comportamiento.

Se puede concluir que gracias al IoT se facilita la labor diaria a aquellos que trabajan en el sector de la agricultura.

5.2 Futuras líneas de investigación

Una vez finalizada la investigación, se presenta la posibilidad de perfeccionar el modelo:

- Aplicar un grado de seguridad en el protocolo MQTT mediante contraseñas para garantizar confidencialidad. De esta manera solamente se comunicarían los publicadores/brokers/suscriptores que tuvieran la clave, y se evitarían filtraciones.
- Empleo de Cloud Computing, es decir, acceso remoto a datos recogidos por los sensores sin necesidad de instalar aplicaciones adicionales. Como el fin del proyecto es ponerlo en práctica en la vida real, habría que buscar la forma más sencilla de implementarlo para que no supusiera un sobre costo innecesario.



Bibliografía

- [1] Moran, M. (2015, enero 7). Bosques, desertificación y diversidad biológica. Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [2] Objetivo 15: Vida en la tierra. (2015, diciembre 14). Sustainable Development Goals Fund. <https://www.sdgfund.org/es/objetivo-15-vida-en-la-tierra>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [3] Acosta, M. B. (2020, abril 2). NUTRICIÓN de las PLANTAS: Proceso con ESQUEMAS. [ecologiaverde.com. https://www.ecologiaverde.com/nutricion-de-las-plantas-proceso-2667.html](https://www.ecologiaverde.com/nutricion-de-las-plantas-proceso-2667.html). [Último acceso: Agosto 2022].
- [4] Gest, H. (2002). History of the word photosynthesis and evolution of its definition. *Photosynthesis research*, 73(1), 7-10. [Último acceso: Agosto 2022].
- [5] Margulis, L., & Sagan, D. (2008). El proceso de nutrición en las plantas. *Fundamentos de fisiología vegetal*, 242-258. [Último acceso: Agosto 2022].
- [6] Prevención y recuperación de suelos salinos. (s/f). [Tecnicrop.com. Disponible en: https://tecnicrop.com/blog/prevencion-y-recuperacion-de-suelos-salinos](https://tecnicrop.com/blog/prevencion-y-recuperacion-de-suelos-salinos). [Último acceso: Agosto 2022].
- [7] Propiedades Químicas. (s/f). [Fao.org. Disponible en: https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/](https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/). [Último acceso: Agosto 2022].
- [8] Suelos Ácidos. (s/f). [Fao.org. Disponible en: https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/](https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/). [Último acceso: Agosto 2022].
- [9] Definición y Origen de la Salinidad. (s/f). [Ivia.es. Disponible en: http://agrosal.ivia.es/definicion.html](http://agrosal.ivia.es/definicion.html). [Último acceso: Agosto 2022].
- [10] (S/f-b). [Intagri.com. Disponible en: https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos](https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos). [Último acceso: Agosto 2022].
- [11] Sensores de Conductividad Eléctrica del Suelo. (s/f). [Hubiberiaagrotech.eu. Disponible en: https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/sensores-de-conductividad-electrica-del-suelo/](https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/sensores-de-conductividad-electrica-del-suelo/). [Último acceso: Agosto 2022].

- [12] Efectos de la Salinidad y la Sodicidad en los cultivos. (s/f). Ivia.es. Disponible en: <http://www.agrosal.ivia.es/efectos.html>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [13] De México, F. (2022, agosto 1). El Estrés por salinidad en las plantas. El blog de Fagro. Artículos y noticias sobre agricultura. <https://blogdefagro.com/2022/08/01/el-es-tres-por-salinidad-en-las-plantas/> [Último acceso: Agosto 2022].
- [14] ¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)? (s/f). TIBCO Software. Disponible en: <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-the-internet-of-things-iot>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [15] Capas de IoT que debes conocer. (2021, noviembre 8). Ciberseguridad. <https://ciberseguridad.com/guias/nuevas-tecnologias/capas-iot/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [16] Gráficos interactivos de visualización de datos con gráficos y gemelos. (2022, junio 30). Datapeaker; datapeaker.com. <https://datapeaker.com/big-data/graficos-interactivos-de-visualizacion-de-datos-con-graficos-y-gemelos/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [17] Noviembre, 24. (2021, noviembre 24). Agricultura 4.0: qué es y cuáles son sus herramientas y beneficios. McCormick. <https://www.mccormick.it/es/agricultura-4-0-que-es-y-cuales-son-sus-herramientas-y-beneficios/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [18] Historia y evolución del dron. (2020, marzo 11). areadron.com. <https://www.aredron.com/historia-y-evolucion-dron/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [19] Drone agrícola. (2017, junio 10). AGROMAP Ingenieros. <http://www.agromapingenieros.com/drone-agricola/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [20] Sensores para la agricultura. (s/f). ENIIT - IT Business School. Disponible en: <https://eniit.es/sensores-para-la-agricultura/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [21] Drone by drone. (s/f). Camaras termograficas en agricultura de precision mediante drones. Dronebydrone.com. Disponible en: <https://www.dronebydrone.com/noticias/560/camaras-termograficas-en-agricultura-de-precision-mediante-drones.html>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [22] Rodríguez, A. (2019, octubre 22). Las mejores cámaras para drones. Iberfdrone; Iberfdrone Formación. <https://iberfdrone.es/camara-mas-usadas-para-drones/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [23] Gallardo, R. (2021, enero 13). Cámaras Multiespectral. AgroTools. <https://www.agrotools.net/post/c%C3%A1maras-multiespectral>. [Último acceso: Agosto 2022].

- [24] ¿Qué es y cómo funciona una cámara multispectral? - 2019. (2017, octubre 10). Aerial Insights. <https://www.aerial-insights.co/blog/camara-multispectral/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [25] Miller, K. (2016, marzo 10). Value in using the correct index: Comparing NDVI, false-NDVI, and VARI. LinkedIn.com; LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/value-near-infrared-debunking-myth-false-ndvi-kyle-miller>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [26] Lanzadera Digital. (2019, julio 26). 4 beneficios del uso de drones en la agricultura. HelixNorth. <https://www.helixnorth.com/blog/4-beneficios-del-uso-de-drones-en-la-agricultura>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [27] Historia, U., Futuro, C., Angel, M. I., Ruiz, C., Bragós Bardía, R., & Areny, R. P. (s/f). Upc.edu. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9553/Article003.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [28] (S/f-c). Udl.<https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/65426/026789.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [29] Castañón, N. (2020, noviembre 27). Sensores inteligentes, la tecnología española para evitar desastres en el campo. El Español. https://www.elespanol.com/omicron/tecnologia/20201127/sensores-inteligentes-tecnologia-espanola-evitar-desastres-campo/538947014_0.html. [Último acceso: Agosto 2022].
- [30] Sensor de Suelo - Tecnología Agrícola. (s/f). Tecnología Agrícola. Disponible en: <https://www.tecnologia-agricola.com/producto/sensor-de-suelo/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [31] Sensor de suelo AT32. (s/f). PRISMAB. Disponible en: <https://prismab.com/producto/sensor-de-suelo-at32>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [32] Sensor ambiental MET3 EXT. (s/f). PRISMAB. Disponible en: <https://prismab.com/producto/sensor-ambiental-met3-ext/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [34] Electrónica, M. (2020, marzo 12). Estación Meteorológica para agricultura: Viento, lluvia, humedad. Maher Electrónica. <https://www.maherelectronica.com/sensores-agricolas-clima/estacion-meteorologica-para-agricultura/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [35] PRISMAB. (2019, agosto 21). Sensores de suelo para agricultura de precisión. PRISMAB. <https://prismab.com/blog/sensores-de-suelo-para-agricultura-de-precision/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [36] Parámetros De Antenas, I. (s/f). Upv.es. Disponible en: http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF. [Último acceso: Agosto 2022].

- [37] MQTT - the standard for IoT messaging. (s/f). Mqtt.org. Disponible en: <https://mqtt.org/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [38] ¿Qué es MQTT? El protocolo de comunicación para IoT. (s/f). Solectroshop.com. Disponible en: <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-mqtt-el-protocolo-de-comunicacion-para-iot-n117>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [39] Mininet: An Instant Virtual Network on Your Laptop (or Other PC) - Mininet. (s/f). Mininet.org. Disponible en: <http://mininet.org/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [40] Introduction to mininet. (s/f). Available: <https://github.com/mininet/mininet/wiki/Introduction-to-Mininet>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [41] Fontes, R. dos R., & Rothenberg, C. E. (2016). Mininet-WiFi: A platform for hybrid physical-virtual software-defined wireless networking research. Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. [Último acceso: Agosto 2022].
- [42] Mininet_part1.Md at master · knetsolutions/learn-sdn-with-ryu. (s/f). [Último acceso: Agosto 2022].
- [43] (S/f-d). Intagri.com. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/frutales/requerimientos-de-clima-y-suelo-en-el-cultivo-de-aguacate#:~:text=Los%20arboles%20de%20aguacate%20requieren,valores%20de%205.5%20a%207.0>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [44] Comins, G. M. (s/f). Agrosal - La Salinidad en la Agricultura. Ivia.es. Disponible en: <http://agrosal.ivia.es/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [45] Cultivo del Aguacate. (s/f). Gva.es. Disponible en: <https://agroambient.gva.es/documents/163228750/169854881/CULTIVO+DEL+AGUACATE.+Ficha+t%C3%A9cnica.pdf/fd75a360-7039-4c0f-8abf-bbd40095d071?t=1616074535590>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [46] IVIA. (s/f). Ivia.es. Disponible en: <http://riegos.ivia.es/cartografia>
- [47] Competencias transversales: UPV. (s/f). Upv.Es. Disponible en: <http://www.upv.es/contenidos/COMPTRAN/info/1026833normalc.html>. [Último acceso: Agosto 2022].