



INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AGRICULTURA INTELIGENTE EN COLOMBIA

*Roberto Ferro Escobar
Carlos Andrés Martínez Alayón
Edgar Alirio Aguirre Buenaventura*

Doctorado
en Ingeniería

<https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co>



**UNIVERSIDAD DISTRICTAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Investigación y desarrollo de una
propuesta para la implementación
de agricultura inteligente en
Colombia

Investigación y desarrollo de una propuesta para la implementación de agricultura inteligente en Colombia

Roberto Ferro Escobar

Carlos Andrés Martínez Alayón

Edgar Alirio Aguirre Buenaventura



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Doctorado
en Ingeniería

<https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co>

Sistema de Bibliotecas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Catalogación en la publicación (CEP)

Ferro Escobar, Roberto

Investigación y desarrollo de una propuesta para la implementación de agricultura inteligente en Colombia / Roberto Ferro Escobar, Carlos Andrés Martínez Alayón, Edgar Alirio Aguirre Buenaventura. -- Primera edición. -- Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctorado en Ingeniería, 2024. 204 páginas : gráficas, diagramas, fotografías ; 24 cm.

ISBN: 978-958-787-730-4 ISBN digital: 978-958-787-731-1

1. Agricultura -- Investigaciones -- Colombia 2. Agricultura sostenible
3. Agricultura alternativa -- Desarrollo tecnológico 4. Tecnología agrícola 5.
Productividad agrícola 6. Innovaciones agrícolas. I. Martínez Alayón,
Carlos Andrés, autor II. Aguirre Buenaventura, Edgar Alirio, autor.

630.68: CDD 23 edición.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas

© Doctorado en Ingeniería

© Roberto Ferro Escobar, Carlos Andrés Martínez Alayón, Edgar Alirio Aguirre Buenaventura (autores)

ISBN impreso: 978-958-787-730-4

ISBN digital: 978-958-787-731-1

Primera edición, noviembre de 2024.

Corrección de estilo y diagramación editorial

Edwin Pardo Salazar

Impresión

E-Desing Ltda.

Doctorado en Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá, D. C., Colombia

Carrera 7 n.º 40B-53 (Semisótano Edificio Administrativo)

Número de contacto: (+57) 6013239300. Extensión 1419

Correo electrónico: doctoradoing@udistrital.edu.co

Todos los derechos reservados.

Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente o transmitida por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni por ningún medio sin el permiso previo escrito del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Hecho en Colombia.

Contenido

Prólogo	17
Introducción	19
Consideraciones preliminares	21
Capítulo 1. Tecnologías IoT	23
Internet de las Cosas (IoT)	23
Tecnologías de comunicación	26
Redes inalámbricas de sensores	27
Redes comunitarias	28
Zigbee	29
Xbee	32
IoT y Fog Computing	33
Informática en la nube	33
Python	35
Sensores para agro inteligente	35
Capítulo 2. Tecnologías de redes LPWAN	41
Sigfox	42
LoRa-LoRaWAN	45
NB-IoT	46
RPMA	49
M2M	49
NB-Fi	50
ETSI LTN	50
LTE-M (eMTC). Grupo 3GPP	51
Weightless	51
DASH7	52

IEEE 802.11ah	52
Comparación entre tecnologías LPWAN	53
Capítulo 3. Contexto y desarrollo de <i>Smart Agro</i>	57
Capítulo 4. IPv6 como estrategia de seguridad <i>Smart Agro</i>	65
Características funcionales del modelo e interacción con IPv6	65
Protocol Next Generation (IPng) IPv6	66
Cabecera IPv4 vs. IPv6	69
Migración a IPv6	71
Estrategias de migración	76
Seguridad de IPv6	79
6LoWPAN	80
Capítulo 5. Drones para la agricultura 4.0	83
Drones	83
Clasificación de los drones	84
Elementos de un dron	85
Drones para agricultura de precisión	86
Teledetección	87
Detección del estado hídrico de las plantas	88
Tratamientos localizados	88
Supervisión de áreas fumigadas	89
Inventarios	89
Siembra aérea	89
Seguridad	90
Aspectos legales para el uso de drones en Colombia	90
Barreras de adopción	92
Capítulo 6. Evaluación de conectividad a internet a nivel rural: caso de estudio aplicado en tres municipios para evaluar la conexión a la agricultura inteligente	93
Escenarios de comportamiento real de telefónica rural	97
Espectro de banda celular (LTE)	102
Localidades	103
Metodología	104
Resultados	109
La Esmeralda, Cundinamarca	109

Gazajujo (Cundinamarca)	117
Sotó (Huila)	125
Capítulo 7. Redes 5G para revolucionar la agricultura inteligente	137
¿Qué es una red 5G?	137
Beneficios de la red 5G	138
Red 5G para conectividad en agricultura inteligente	139
Interconectividad entre fincas	139
Sistema de monitoreo	140
Maquinaria independiente	141
Casos de uso prometedores	141
Redes 5G en Colombia	143
Capítulo 8. Políticas rurales en Colombia	145
Capítulo 9. Comunidades para agricultura inteligente	155
Servicios de agricultura inteligente	157
Principios de una arquitectura para agricultura inteligente	159
Arquitectura lógica	160
Etapas de implementación de arquitectura para agricultura inteligente	162
Capítulo 10. Resultados del proyecto de investigación	167
Preguntas realizadas	168
Análisis de las respuestas	171
Resultados de la investigación	177
Funcionamiento de Sigfox	179
Funcionamiento de LoRaWAN	180
Resultados de la investigación sobre incorporación de IoT en agricultura inteligente	182
Conclusiones	185
Ventajas de la agricultura inteligente basada en IoT y sensores conectados	185
Desventajas y desafíos	186
Referencias	193
Autores	201

Índice de figuras

Figura 1.	La revolución de los objetos conectados	24
Figura 2.	Componentes IoT	25
Figura 3.	Tecnologías IoT	26
Figura 4.	Clasificación de redes según el alcance y la cobertura geográfica	27
Figura 5.	Aplicaciones de los perfiles del protocolo Zigbee	30
Figura 6.	Módulo Xbee serie 2	33
Figura 7.	Informática en la nube	34
Figura 8.	Sensor de macronutrientes NPK	37
Figura 9.	Sensor de humedad relativa	38
Figura 10.	Sensor de velocidad de aire	38
Figura 11.	Sensor de humedad del suelo	39
Figura 12.	Posicionamiento de redes con tecnologías LPWAN	42
Figura 13.	Comparación de las tecnologías Weightless	52
Figura 14.	Comparación de las tecnologías de red según su evolución de mercado y facilidad de uso	53
Figura 15.	Situación del mercado IoT	54
Figura 16.	Lanzamiento del primer laboratorio de IoT en Colombia	62
Figura 17.	Proyecto para beneficiar a familias caficultoras en Nariño	63
Figura 18.	Comparación de la cabecera IPv6 e IPv4	70
Figura 19.	Mecanismos de transición a IPv6	75
Figura 20.	Mecanismos de conexión de nodos WSN mediante 6LoWPAN a IPv6	81
Figura 21.	Evolución de la telefonía celular en países avanzados	94
Figura 22.	Indicadores de rendimiento de las redes 4G y 5G	97
Figura 23.	La Esmeralda	106
Figura 24.	Cundinamarca	107

Figura 25.	Huila	109
Figura 26.	Integrity-LTE Radio-RSP-PDF	110
Figura 27.	Servicio por celdas RSRP en dBm	110
Figura 28.	Integrity-LTE Radio-RSRQ-PDF	111
Figura 29.	Servicio por celdas RSRP en dBm	111
Figura 30.	QualiPoc_125793-Integrity-LTE Radio RSRP-PDF	112
Figura 31.	Servicio por celdas RSRP en dBm	113
Figura 32.	QualiPoc_125793-Integrity-LTE Radio RSRP-PDF	113
Figura 33.	Servicio por celdas RSRP en dBm	114
Figura 34.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-0	115
Figura 35.	Servicio por celdas RSRP en dBm	116
Figura 36.	Idle-Integrity-LTE Radio RSRP-PDF	116
Figura 37.	Servicio por celdas RSRP en dBm	117
Figura 38.	Integrity-LTE Radio Canal 9460	118
Figura 39.	Servicio por celdas RSRP en dBm	118
Figura 40.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-2	119
Figura 41.	Servicio por celdas RSRP en dBm	120
Figura 42.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-3	121
Figura 43.	Servicio por celdas RSRP en dBm	121
Figura 44.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-4	122
Figura 45.	Servicio por celdas RSRP en dBm	122
Figura 46.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-5	123
Figura 47.	Servicio por celdas RSRP en dBm	124
Figura 48.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-6	124
Figura 49.	Servicio por celdas RSRP en dBm	125
Figura 50.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-7	126
Figura 51.	Servicio por celdas RSRP en dBm	127
Figura 52.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-8	127
Figura 53.	Servicio por celdas RSRP en dBm	128
Figura 54.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-9	129
Figura 55.	Servicio por celdas RSRP en dBm	129
Figura 56.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-10	130
Figura 57.	Servicio por celdas RSRP en dBm	131

Figura 58.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-11	132
Figura 59.	Servicio por celdas RSRP en dBm	132
Figura 60.	Integrity-LTE Radio Canal 9460-12	133
Figura 61.	Servicio por celdas RSRP en dBm	134
Figura 62.	Puntos estáticos tomados sobre el mapa de la localidad	134
Figura 63.	Sectores productivos de mayor aplicación redes y servicios bajo tecnología 5G	143
Figura 64.	Barreras de despliegue	144
Figura 65.	Dominios del modelo de arquitectura empresarial	148
Figura 66.	Etapas de implementación de proyectos para comunidades de agricultura inteligente	156
Figura 67.	Servicios para agricultura inteligente	158
Figura 68.	Principios de la arquitectura que deben tener las comunidades para agricultura inteligente	160
Figura 69.	Arquitectura lógica	161
Figura 70.	Propuesta para la inclusión de IoT y tecnología de punta en agricultura inteligente en Colombia	165
Figura 71.	Gráfica de resultados pregunta 1 de la encuesta	171
Figura 72.	Gráfica de resultados pregunta 2 de la encuesta	172
Figura 73.	Gráfica de resultados pregunta 3 de la encuesta	172
Figura 74.	Gráfica de resultados pregunta 4 de la encuesta	173
Figura 75.	Gráfica de resultados pregunta 5 de la encuesta	173
Figura 76.	Gráfica de resultados pregunta 6 de la encuesta	174
Figura 77.	Gráfica de resultados pregunta 7 de la encuesta	174
Figura 78.	Gráfica de resultados pregunta 8 de la encuesta	175
Figura 79.	Gráfica de resultados pregunta 9 de la encuesta	176
Figura 80.	Gráfica de resultados pregunta 10 de la encuesta	176

Índice de tablas

Tabla 1.	Comparación de las tecnologías de comunicación LPWAN-IoT	54
Tabla 2.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-1	109
Tabla 3.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-2	112
Tabla 4.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-3	114
Tabla 5.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-4	117
Tabla 6.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-5	120
Tabla 7.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-6	123
Tabla 8.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-7	125
Tabla 9.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-8	128
Tabla 10.	Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-9	131
Tabla 11.	Velocidades de DL y UL	135
Tabla 12.	Comparación de velocidades	138

Prólogo

En este libro se presenta el desarrollo de una investigación en el marco de las líneas temáticas del grupo de investigación Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Redes (LIDER) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En este documento se abordan aspectos importantes, relacionados con los conceptos de *Smart Agro* o *agricultura inteligente* en nuestro país. Desde hace varias décadas, Colombia se ha destacado por su diversidad en los cultivos, con productos que incluso no se cosechan en otros países de la región o del mundo. Desde el punto de vista científico, los autores del libro pretendemos dejar las bases fundamentales que se deben desarrollar para la integración de múltiples aspectos en el ámbito tecnológico, junto con políticas de desarrollo agrícola.

Asimismo, en el libro se revisan diferentes tipos de sensores y actuadores que, con ayuda de tecnologías de redes LPWAN, como LoRaWAN y Sigfox, se deben instalar en puntos específicos de los cultivos que se desean controlar. También, se analiza la comunicación inalámbrica en los puntos de recepción de paquetes de datos, la comunicación de estos al interior de los nodos ubicados en las fincas agrícolas, el acceso de última milla por medio de redes de telefonía 4G o 5G y su integración a protocolos como IPv6 para el manejo de esquemas en las redes de transmisión de datos. Este último aspecto es muy importante, dado que permite evitar posibles pérdidas de

información e intrusiones que pueden afectar el funcionamiento de los dispositivos. Además de esto, es necesario contar con aplicaciones a la medida, fundamentales en la toma de decisiones para los agricultores.

Con el uso de la inteligencia artificial y la robótica, así como la implementación de conceptos de la industria 4.0 y el estudio de la eficiencia energética, es posible mejorar la productividad del sector rural en Colombia, reducir el costo de los alimentos y mejorar su calidad, para que en un futuro cercano el sector agropecuario pueda ser más competitivo a nivel regional, nacional e internacional. Por último, es importante destacar el papel de las universidades como centros de excelencia académica y de transferencia del conocimiento, que constituyen el pilar de la investigación para encontrar soluciones a los problemas reales del país, por medio de la innovación, la ciencia y la tecnología.

Introducción

Colombia es un país que sobresale a nivel mundial por su diversidad agropecuaria; geográficamente está atravesado por tres cordilleras, tiene acceso a dos océanos y a una gran variedad de pisos térmicos. Estas condiciones hacen de Colombia un país ideal para el turismo y la producción de diferentes alimentos. Actualmente, el país se encuentra adelantando un proceso para revisar, mejorar y actualizar sus políticas rurales, con el fin de mejorar la productividad agrícola y ser eficiente en el uso de los recursos naturales. Por lo tanto, es muy importante alinear el uso de la tecnología en los cultivos y la producción alimentaria a partir de la implementación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), la utilización de drones para la agricultura de precisión, el acceso de última milla por medio de redes 4G y 5G, así como aspectos de seguridad de redes por medio del protocolo IPv6.

La incorporación de tecnologías IoT, como Sigfox, LoRaWAN y otras similares en una política de tecnificación agrícola en un país en desarrollo como Colombia, puede impulsar la modernización del sector al permitir la adopción de soluciones inteligentes y conectadas. Mediante el despliegue de infraestructura de red cableada e inalámbrica, la capacitación y el apoyo a la investigación, los agricultores pueden beneficiarse de la monitorización remota de cultivos, recursos naturales y la eficiencia energética, lo que lleva

a una mayor eficiencia en el uso de recursos, una mejora en la productividad y la sostenibilidad agrícola.

Además, al facilitar el acceso a financiamiento y fomentar la colaboración público-privada, se pueden superar barreras económicas y tecnológicas, lo que les permite a los países en vía de desarrollo aprovechar las ventajas tecnológicas para fortalecer la seguridad alimentaria y el desarrollo económico en las áreas rurales.

La integración de la telefonía celular 5G, IPv6 e IoT en el desarrollo de la agricultura inteligente es un enfoque potente para transformar y aumentar la eficiencia agrícola y el cultivo limpio que no contamine el medioambiente. La implementación de redes 5G ofrece altas velocidades de conexión, baja latencia y mayor capacidad de transferencia de datos, lo que permite una conectividad más rápida y confiable para los dispositivos IoT utilizados en la agricultura inteligente.

Si se aprovecha la tecnología 5G, se pueden transmitir datos en tiempo real desde sensores y dispositivos conectados en los campos agrícolas, lo que permite una toma de decisiones más ágil y precisa para el monitoreo de cultivos, control de riego y manejo de recursos naturales. El protocolo IPv6 desempeña un papel clave al proporcionar un espacio de direcciones suficiente para dar soporte a la gran cantidad de dispositivos IoT que se conectan a través de 5G. Con su amplio rango de direcciones, IPv6 permite una expansión masiva de la red de IoT sin preocupaciones por la escasez de direcciones IPv4. Esto es fundamental para la agricultura inteligente, ya que se pueden asignar direcciones únicas a cada sensor y dispositivo, lo que facilita la identificación y gestión individualizada.

Consideraciones preliminares

Este libro aborda la problemática relacionada con la agricultura inteligente y los factores que la rodean, desde el punto de vista de la tecnología IoT y su desarrollo asociado al ámbito político. Con la integración de estos dos aspectos, se busca un beneficio real para los pequeños y grandes agricultores, mediante la realización de planes rurales de desarrollo de tipo local, regional y nacional; solo de esta forma es posible realizar una verdadera reforma agrícola, que potencialice al país y permita a los agricultores salir de la pobreza. Esto, además, evitará su vinculación a la producción de cultivos ilícitos, que dañan la tierra, y con el tiempo, traen grandes problemas y consecuencias negativas para el campo.

De acuerdo con lo anterior los objetivos planteados en la presente investigación son:

- Definir los aspectos relacionados con las granjas inteligentes que puedan ser entendidos por diferentes actores, como agricultores, académicos y los sectores políticos que dictan las normas relacionadas con este campo del conocimiento.
- Estudiar los diferentes tipos de tecnologías inalámbricas tipo WSN que permitan ser implementadas en agricultura inteligente para automatizar

los cultivos y facilitar la toma de decisiones en favor del agro y la seguridad alimentaria.

- Estudiar el protocolo de conexión a internet tipo IPv6 y la forma que este protocolo permite garantizar la seguridad de las redes y de los paquetes que viajan a través de ella.
- Investigar el uso de drones como herramienta tecnológica para la agricultura inteligente.
- Estudiar la conectividad actual a redes de telefonía celular como mecanismo de acceso de última milla en sectores que no cuentan con acceso de fibra óptica basado en el caso de estudio de tres municipios en los departamentos de Cundinamarca y Huila en Colombia.
- Estudiar la red de telefonía celular 5G como aspecto fundamental para el acceso al entorno rural en Colombia.
- Analizar las políticas rurales, la reforma agraria 2018-2022 y las comunidades agropecuarias inteligentes, con el fin de proponer aspectos que se puedan tener en cuenta a futuro por el gobierno.

Capítulo 1. Tecnologías IoT

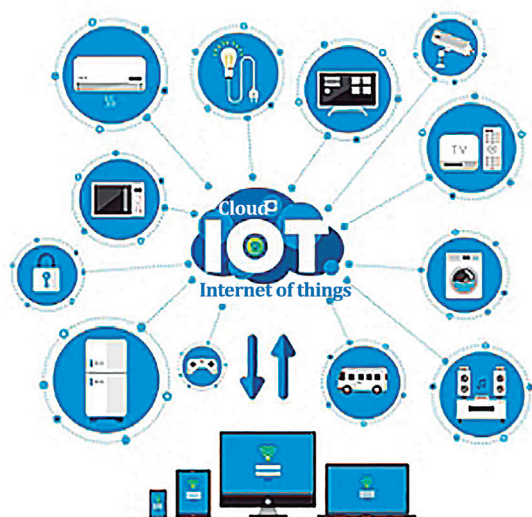
En el ámbito de la investigación científica, hacemos referencia a la frontera del conocimiento o estado más reciente en un área específica, en términos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i); se incluyen todos aquellos desarrollos de última tecnología realizados a un producto, que han sido probados teórica y empíricamente como conocimiento científico, aceptados en la industria y acogidos por diferentes fabricantes o por la sociedad.

A continuación, se presenta una revisión sobre la producción documental dentro del dominio del conocimiento y los conceptos más importantes que permiten identificar los aspectos que contextualizan la temática general de esta investigación.

Internet de las Cosas (IoT)

El concepto de IoT (o Internet of Things) es muy amplio y puede implicar muchos campos de la tecnología. Se puede definir como un paradigma tecnológico que resume la posibilidad de conectar a internet cualquier objeto sobre el que se pueda medir su comportamiento, así como de las aplicaciones y los análisis de datos inteligentes relativos a los mismos.

Figura 1. La revolución de los objetos conectados



Fuente: Nyambi (2016).

El término IoT, aunque fue utilizado normalmente en ambientes de investigación desde 1999, encontró su masificación recientemente. Públicamente, fue presentado por primera vez en el 2009 por el profesor Kevin Ashton en *RFID Journal* (Ashton, 2009) y desde aquel manuscrito su uso ha ido creciendo de forma exponencial. En la actualidad, este concepto es ampliamente utilizado en todo tipo de artículos, publicaciones y libros científicos y tecnológicos, de forma directa o haciendo alusión indirecta a las definiciones relacionadas. Para comprender con mayor profundidad el origen del IoT es necesario analizar el desarrollo de las distintas tecnologías que hacen posible su funcionamiento (Cruz, 2015).

Asimismo, en el libro *Las tecnologías IoT dentro de la industria conectada: Internet of Things* (Cruz, 2015), se mencionan varios aspectos que caracterizan el amplio concepto del IoT: protocolos, estándares, consorcios, redes, apertura de interfaces, tecnologías de comunicación y entornos de desarrollo, pues con la popularización de las redes inalámbricas, como wifi o redes celulares, durante el siglo XXI se presencié una explosión en su crecimiento. A esto, se ha sumado la aparición de las redes de sensores (Wireless Sensor Networks, WSN) o las conexiones máquina a máquina (Machine to Machine, M2M), las cuales han dado lugar al actual Internet de las Cosas.

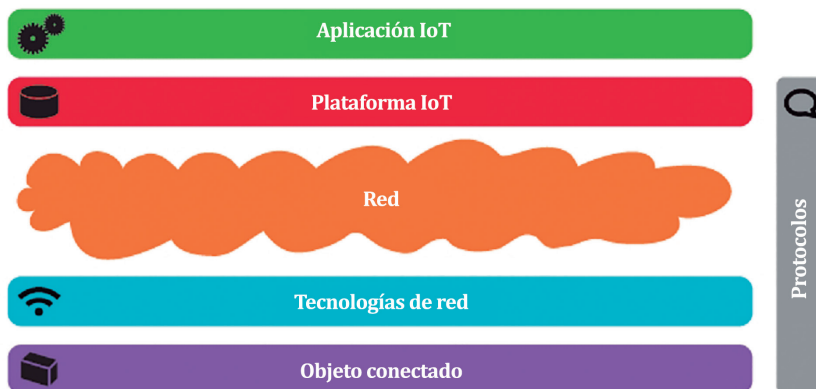
A diferencia de los demás, IoT abarca conceptos relacionados con los protocolos, los estándares, los consorcios, las redes, la apertura de interfaces, las tecnologías de comunicación y los entornos de desarrollo, lo que genera grandes expectativas en el futuro.

Arquitectura IoT

A partir de la definición de Cruz (2015), se exponen los elementos que constituyen una arquitectura para el correcto funcionamiento de IoT. Al respecto, la arquitectura del IoT se puede estructurar conforme podemos ver en la Figura 2, con las siguientes áreas (*Internet de las Cosas: la revolución de los objetos conectados*, 2014):

- Objetos conectados.
- Tecnologías de red.
- Protocolos de comunicación.
- Plataforma IoT de tratamiento de datos.
- Aplicaciones de usuario.

Figura 2. Componentes IoT



Fuente: Cruz (2015).

Tecnologías de IoT

Las distintas arquitecturas presentes en el mundo IoT dejan componentes abiertos a su integración con distintas tecnologías en función de la aplicación,

las redes disponibles, el consumo energético, los costes de producción o el mantenimiento y las implicaciones industriales o políticas.

De esta forma, se puede hacer una clasificación de las distintas tecnologías de IoT (*Internet de las Cosas: la revolución de los objetos conectados*, 2014).

Figura 3. Tecnologías IoT



Fuente: Cruz (2015).

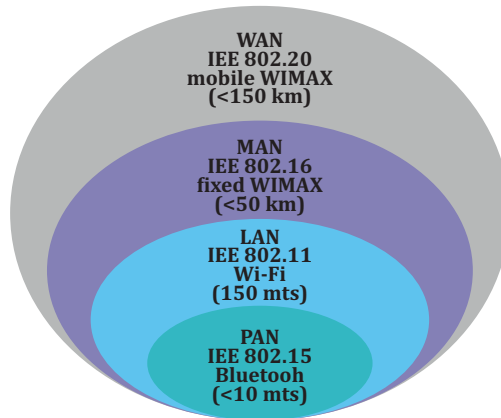
Tecnologías de comunicación

En los últimos años, las redes de comunicación han ido evolucionando hacia el sector de IoT; han surgido varias redes que intentan satisfacer esta demanda, mientras que otras se han adaptado. Teniendo en cuenta que el término IoT engloba cualquier par de objetos que estén conectados a la red y no estén próximos entre sí, este sector es realmente amplio (Pérez-García, 2014). Las redes se pueden clasificar según su alcance, de la siguiente forma (Munera, 2018) (Figura 4):

- **Personal Area Network (PAN):** son redes que abarcan un rango de apenas unos metros. Sirven para conectar varios dispositivos típicamente en la misma habitación. Ejemplo: Bluetooth.
- **Local Area Network (LAN):** son redes que abarcan un rango de pocas decenas de metros. Sirven para conectar dispositivos dentro del espacio de un edificio pequeño. Ejemplo: wifi.

- Metropolitan Area Network (MAN): son redes que abarcan el tamaño de una ciudad, aproximadamente 10 kilómetros. Sirven para dotar de conectividad áreas residenciales. Ejemplo: WiMAX.
- Wide Area Network (WAN): son las redes más extensas, cubren países o continentes enteros. Sirven para comunicar entre sí varias LAN. Ejemplo: 3G o Wimax extendido.

Figura 4. Clasificación de redes según el alcance y la cobertura geográfica



Fuente: Castillo (2017).

Redes inalámbricas de sensores

Son conocidas por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network (WSN) o RIS en español. Generalmente, están definidas como una red autónoma que funciona a partir del arreglo de varios nodos inteligentes (dispositivos o sensores), los cuales se interconectan entre sí con el objetivo de medir variables físicas del ambiente y compartir información en un entorno tecnológico, para facilitar la toma de decisiones. Pueden funcionar basadas en estándares abiertos para facilitar su interconexión y funcionamiento versátil de acuerdo con las condiciones del entorno. En el 2003 fueron catalogadas por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) como una de las diez tecnologías que intervendrían favorablemente en el cambio de los paradigmas tecnológicos del mundo (Egea y Vales, 2004).

Redes comunitarias

Las redes digitales comunitarias (RDC) se entienden como aquellas redes tipo LAN que permiten el libre acceso inalámbrico a diferentes tipos de recursos y servicios, disponibles en internet o en una red local. Estas hacen uso de varias tecnologías, caracterizadas por ser diseñadas e implementadas por grupos u organizaciones sin ánimo de lucro, y que contribuyen efectivamente al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades donde funcionan, cuya brecha digital, en general, es significativa.

Para la implementación de las redes inalámbricas comunitarias, se pueden utilizar topologías en malla como las redes MESH (Wireless Mesh Network, WMN). Estas son una tecnología novedosa que permite tener una estructura propia para la comunicación de varios nodos no centralizados. Dichas redes inalámbricas prestan distintos servicios a las redes convencionales, como la transmisión de información que pasa por diferentes nodos, los cuales forman la red.

Las redes MESH permiten unirse a las redes de diferentes dispositivos inalámbricos, con el objetivo de crear puntos de acceso (Access Points, AP) con los dispositivos que se conecten y, así, brindar una mayor cobertura. Dentro del entorno inalámbrico de las redes MESH el enrutamiento entre los nodos de la red no tiene una topología específica, ya que estas rutas pueden cambiar. Esto significa que la información que se envíe tiene que pasar entre diferentes nodos hasta que llegue a su destino.

La topología de la red MESH, como su nombre lo indica, es en malla, por lo que cada uno de los nodos proporciona diferentes rutas para recibir y enviar información de un nodo a otro por distintos caminos. Si en la red todos los nodos están conectados no va a ocurrir ninguna interrupción en la comunicación y sus entornos serán dinámicos. Los nodos de las redes funcionan como cliente y permiten la comunicación entre nodos en un modelo P2P (*peer to peer*). Los clientes que se conectan se convierten en nodos de comunicación, facilitan la transmisión de los datos y evitan la instalación de una infraestructura de red centralizada que puede acarrear mayor costo y recursos tecnológicos para su implementación (Mendoza, 2017).

Zigbee

Es una tecnología inalámbrica de baja complejidad, con una tasa de transmisión de datos y consumos de energía muy bajos, que implica bajos costos en la implementación para su funcionamiento. Fue creada en el 2004, con la aparición de la ZigBee Alliance (Kampfer, 2020) y funciona en conjunto con la suite de protocolos IEEE 802.15.4. Adicionalmente, ofrece la facilidad de agregar o quitar nodos de la red sin restricciones y sigue la definición por capas del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos Open System Interconnection (OSI) (Vera, *et al.*, 2017). Su nombre se debe, en gran parte, al movimiento típico en zigzag realizado por las abejas para su comunicación; estas comparten con los demás miembros de la colonia, a través de este método, información como la dirección de vuelo, la distancia entre puntos y el estado del alimento encontrado (Loyola, 2015).

Un módulo Zigbee, generalmente, se compone de cuatro componentes principales: el sistema de comunicación inalámbrica basado en radiofrecuencia, el gestor de las comunicaciones que permite la implementación del protocolo, la parte encargada del procesamiento de la información recibida o generada por sensores o actuadores, y el sistema de alimentación que brinda energía al dispositivo.

La manera más sencilla de implementar un módulo Zigbee es mediante un microcontrolador que se adquiere comercialmente. Este componente es el que precisa más tiempo, dado que es necesario gran parte de todo el *hardware*, incluyendo la radiofrecuencia, que suele ser uno de los componentes de mayor complejidad a la hora de poner en funcionamiento un dispositivo Zigbee.

Una manera más eficaz y rápida, pero más costosa, de implementar un módulo Zigbee, es utilizar uno de los dispositivos existentes en el mercado, con el *hardware* ya desarrollado. Esto contribuye a simplificar la programación y depuración del microcontrolador, incluyendo los conectores integrados, que son de gran utilidad, así como los sensores, una memoria EEPROM, un depurador embebido, diodos LED y botones de programación del *software* de inicialización (Rodríguez, 2015).

Principio de funcionamiento de una red Zigbee

La función característica de Zigbee es el establecimiento de una comunicación entre varios dispositivos a través de una topología de red jerárquica; además, añade características en la red, como la autenticación, la encriptación, la asociación y los servicios de aplicación de la capa superior.

La arquitectura de la pila de Zigbee está compuesta por un conjunto de bloques, denominados capas. Cada una de estas capas contiene una unidad de servicios propios para la capa superior. Una unidad de datos suministra un servicio de transmisión de la información; mientras que una unidad de gestión se encarga de los demás servicios. Cada unidad de servicio muestra una interfaz a la capa superior a través de un punto de acceso de servicio (SAP), y simultáneamente, cada SAP soporta un número de servicios primarios para su correcto funcionamiento.

El estándar IEEE 802.15.4 define las dos capas inferiores: la capa física y la subcapa de control de acceso al medio (MAC), por tanto, ZigBee Alliance, teniendo en cuenta estas dos capas, proporciona la capa de red (NWK) y el *framework* o marco de trabajo para la capa de aplicación. Cabe resaltar que el marco de la capa de aplicación consiste en la subcapa de apoyo a la aplicación (APS) y los objetos del dispositivo Zigbee (ZDO).

Figura 5. Aplicaciones de los perfiles del protocolo Zigbee

	ZigBee RF4CE		ZigBee PRO						ZigBee IP
Aplication Standard	ZigBee Remote Control	ZigBee Input Device	ZigBee building Automation	ZigBee health Care	ZigBee Home Automation	ZigBee Retail Servicea	ZigBee Smart Energy 1.x	ZigBee Telecom Servicea	ZigBee Smart Energy 2.0
Network	ZigBee RF4CE		ZIGBEE pro						ZigBee IP
MAC	IEEE 802.15.4 - MAC								IEEE 802.15.4-MAC
PHY	IEEE 802.15.4 Sub-GHz (specifed per region)			IEEE 802.15.4 - 2.4 GHz (worldwide)					IEEE 802.15.4 2006 - 2.4GHz ir other

Fuente: Rodríguez (2015).

Entretanto, los componentes de la aplicación propios del fabricante utilizan el marco y comparten APS y los servicios de seguridad con el ZDO. La subcapa MAC controla el acceso al medio en el canal de radio mediante el mecanismo CSMA-CA (acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones). De igual modo, incluye la transmisión de tramas de las balizas, la sincronización y el suministro de un mecanismo de transmisión fiable (Alliance, 2015).

Bandas de frecuencia usadas en Zigbee

Un dispositivo Zigbee deberá ser compatible con alguna de las siguientes opciones: OQPSK PHY en la banda de frecuencia de 2,4 GHz o BPSK PHY en ambas bandas de 868 MHz y 915 MHz. Cada una de las bandas de frecuencia incluye su propio conjunto de canales a través de una combinación de números e identificación de los canales.

Un dispositivo Zigbee debe utilizar un identificador de canales cero, cuyos números son: el canal 0 para la banda de 868 MHz; los canales del 1 al 10 para la banda de 915 MHz; y los canales del 11 al 26 para la banda de 2450 MHz (Alliance, 2015).

Alcance de los dispositivos Zigbee

Zigbee tiene un rango de cobertura de 10 a 100 metros; sin embargo, es importante tener en cuenta que este tipo de tecnología es compartida, por tanto, puede tener módulos y chips de diferentes fabricantes para su interconexión. Digi es una entidad que ofrece *software* y módulos de radio frecuencia (RF) integrados, dentro de los cuales se encuentra el módulo XBee, certificado por la ZigBee Alliance, que beneficia y facilita el despliegue de las tecnologías inalámbricas, sobre todo en dispositivos electrónicos aplicados a ciudades inteligentes, agricultura inteligente, redes de sensores, automatización industrial, medicina y aplicaciones de seguimiento de activos.

Igualmente, existen módulos XBee que manejan largas distancias de comunicación, por ejemplo, XBee Pro S3B, cuyo rango de cobertura puede llegar hasta los 45 km con la antena apropiada y de acuerdo con el estándar definido (Alliance, 2015).

Velocidad de transmisión de Zigbee

Zigbee tiene una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps a 2,4 GHz. Simultáneamente, maneja 40 Kbps en 915 MHz y 20 Kbps a 868 MHz. Se puede observar que, a mayor frecuencia, la velocidad de transmisión de datos es superior, aspecto que implica un buen rendimiento y una menor latencia. Sin embargo, a menor frecuencia, el dispositivo se comporta con una mejor sensibilidad y proporciona un área mayor de cobertura (Alliance, 2015).

Xbee

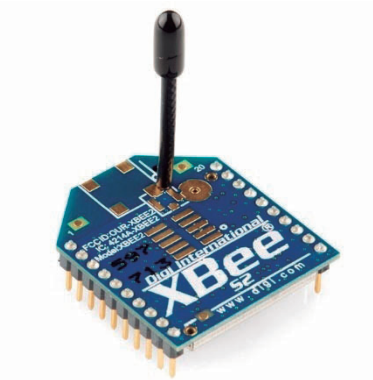
Son módulos fabricados por Digi International que permiten establecer una comunicación inalámbrica a través de radiofrecuencia en la banda ISM de 2,4 GHz; utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 (Zigbee) para crear redes punto a multipunto o redes punto a punto y se encuentran diseñados para soportar alto tráfico en condiciones de baja velocidad, hasta 250 Kbps.

Estos cuentan con entradas y salidas de tipo analógico y digital, que resultan muy útiles para la creación de redes inalámbricas de sensores en entornos urbanos, rurales, domóticos y en ecosistemas para IoT. Existen cuatro tipos de módulos, las primeras series producidas no son compatibles entre sí; sin embargo, los dispositivos de la serie 2 y 3 no tienen inconveniente en su funcionamiento porque se interconectan (DIGI, s.f.).

Sus principales características son las siguientes:

- Rango en interiores: 90 m.
- Rango en exterior (LOS): 1500 m.
- Potencia transmitida: 10 mW (+10 dBm).
- Sensibilidad: -102 dBm.
- Interfaces I/O: 3.3V CMOS UART, SPI, I2C, PWM, DIO, ADC.
- Alimentación: 2,7-3,6 VDC.

Figura 6. Módulo Xbee serie 2



Fuente: Mecatrónica UASLP (2010).

IoT y Fog Computing

La computación en la niebla, más conocida como *Fog Computing*, amplía el paradigma de *Cloud Computing* (computación en la nube) al borde de la red; aparece así, una nueva generación de aplicaciones y servicios (Bonomi *et al.*, 2012)

El *Fog Computing* tiene como objetivo acercar el procesamiento a los usuarios finales y evitar una explotación excesiva de los recursos de la nube con la reducción de las cargas computacionales (Guardo, 2018).

Las características que definen la niebla son: la baja latencia, el conocimiento de la ubicación, la distribución geográfica amplia, la movilidad, el número muy grande de nodos, la función predominante del acceso inalámbrico, la fuerte presencia de aplicaciones de transmisión en tiempo real y la heterogeneidad. Estas características hacen que el *Fog Computing* se convierta en la plataforma adecuada para una serie de servicios y aplicaciones de IoT (Bonomi, 2012).

Informática en la nube

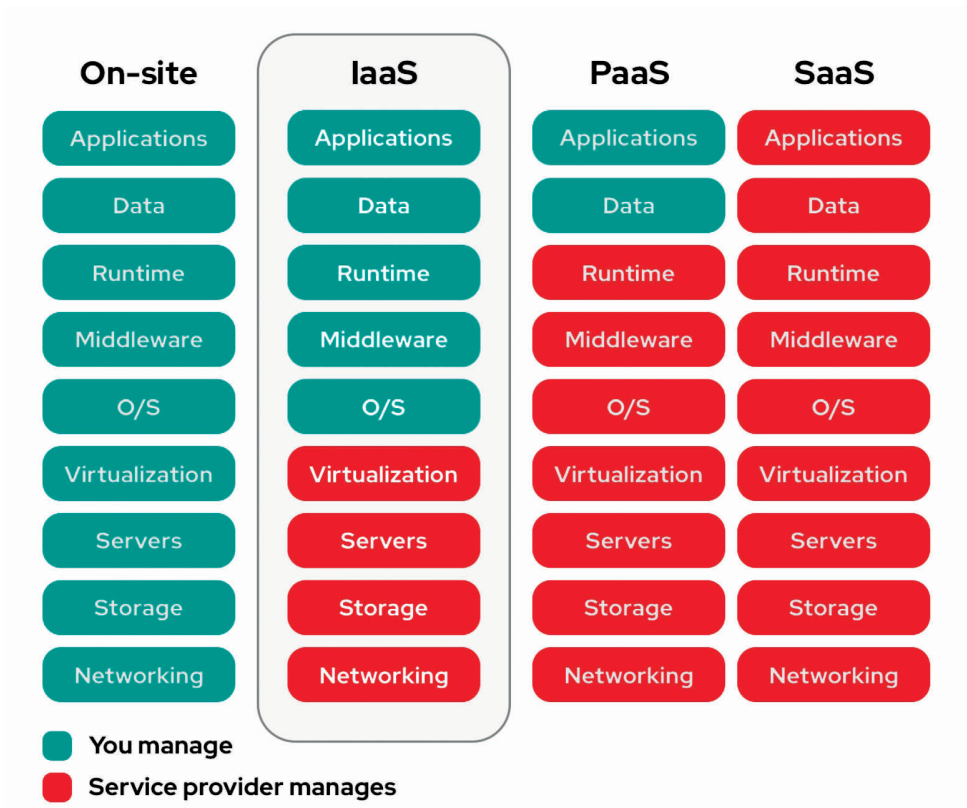
Es definida como el suministro; la baja demanda de recursos de tecnologías de la información (TI) se caracteriza por la potencia de computación, el almacenamiento de bases de datos, las aplicaciones, entre otros, por medio de una plataforma que se encuentra localizada en la nube y que funciona en

una modalidad de pago por uso. Esta plataforma permite que se tenga acceso rápido a recursos de TI flexibles y de bajo costo, lo cual representa una gran ventaja al evitar inversiones iniciales en *hardware*.

Existen tres tipos de informática en la nube: infraestructura como servicio (IaaS), plataforma como servicio (PaaS) y *software* como servicio (SaaS).

Según Amazon, la IaaS se caracteriza por contener los elementos básicos de TI, normalmente ofrece acceso a características de redes, máquinas virtuales, *hardware* específico y espacio para almacenamiento de datos. La característica principal de IaaS es que proporciona un mayor control de administración de los recursos de TI, y es la opción que más se asemeja a los recursos de TI con los que normalmente trabajan y están familiarizados muchos desarrolladores y departamentos.

Figura 7. Informática en la nube



Fuente: Red Hat Inc. (2021).

Por su parte, la PaaS se caracteriza porque la organización que adquiere los servicios no tiene que administrar la infraestructura subyacente (*hardware* y sistemas operativos), lo que le permite centrarse en implementar y administrar sus aplicaciones. De esta forma, se aumenta la eficiencia, ya que los usuarios no se deben inquietar por comprar recursos, planificar la capacidad, mantener el *software*, entre otros; solo deben preocuparse por mantener los aplicativos (Santana *et al.*, 2020).

Finalmente, el SaaS se caracteriza por ofrecer un producto completo, cuya ejecución y administración está a cargo del proveedor del servicio. Este tipo de servicio ocasiona que el usuario solo deba preocuparse de cómo usar el *software* y no de cómo mantener el servicio o la infraestructura subyacente. Normalmente, se conoce como aplicaciones de usuario final; un claro ejemplo puede ser el correo electrónico basado en la web.

Python

Es un lenguaje de programación de alto nivel, diseñado por Guido Van Rossum; se encuentra en continuo desarrollo gracias a una amplia comunidad de desarrolladores. Este lenguaje de programación es interpretado, lo que significa que para ejecutarse debe utilizar un programa intermedio que se llama intérprete; es de tipo multiplataforma y está orientado a objetos, su sintaxis es sencilla y muy cercana al lenguaje natural, por lo cual es muy fácil de aprender. Incluso, es considerado como el mejor para aprender a programar (Romano, 2015).

Sensores para agro inteligente

Las investigaciones que se han realizado en el sector agrícola y la evolución de la tecnología a nivel agro posibilitan la obtención de datos en tiempo real a través de varios tipos de sensores, los cuales son de fácil acceso, tanto en tamaño como en factor económico (Burton, 2020).

En el mercado hay una gran variedad de sensores de suelo para la medición de sus variables, como el PH (potencial de hidrógeno, que determina la acidez o alcalinidad de los suelos), la conductividad eléctrica, la temperatura y la humedad relativa y los macronutrientes, entre otros, que utilizan varios

tipos de técnicas de medición para la obtención de datos fisicoquímicos requeridos en la agricultura.

Sensores NPK

En cuanto a las variables principales NPK (nitrógeno, fósforo y potasio), cabe nombrar que el análisis químico se lleva a cabo mediante tres métodos: conductividad, óptico y electroquímico. Sin embargo, dentro de las opciones disponibles, la mayoría de sensores emplean técnicas ópticas y electroquímicas (Burton, 2020).

El principio de funcionamiento de los sensores ópticos es la interacción entre la luz incidente y las propiedades de la superficie del suelo, es decir, la luz reflejada tiene una variación que depende de las propiedades físicas y químicas disponibles en el terreno; los resultados obtenidos por estos dispositivos son fiables, la desventaja es el tiempo por muestra, la complejidad y el alto costo (Gavade y Bhoi, 2017).

El principio de funcionamiento de los sensores electroquímicos es el ajuste de una capa químicamente selectiva, la cual se denomina elemento de reconocimiento a un transductor electroquímico. Básicamente, cuando el ion que se requiere para obtener información entra en contacto con el elemento de reconocimiento, se produce una energía química, la cual es convertida por el transductor en una señal eléctrica (Burton, 2020).

El método electroquímico ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de la fertilidad del suelo, lo que lleva al éxito de este proceso, que se hace de manera directa; por tanto, es una de las principales aplicaciones de los sensores en agricultura de precisión, pues lo hace ver como una alternativa para el desarrollo e implementación en los cultivos de la región, y contribuye al mejoramiento del rendimiento y la calidad de los productos (Chapungo y Postolache, 2021).

En la Figura 8 se presenta una sonda que mide las variables de nitrógeno, fósforo y potasio presentes en el suelo; facilita al agricultor la evaluación para determinar la cantidad necesaria de macronutrientes requeridos en los cultivos. Este sensor se inserta en el suelo y, con la capacidad de una larga duración de tiempo en él, ya que tiene resistencia electrolítica, a la oxidación,

a la sal y a la corrosión, arroja resultados que contribuyen al análisis del terreno y brinda resultados clave para la implementación de cultivos.

Figura 8. Sensor de macronutrientes NPK



Fuente: Renke (2022).

Sensores de humedad relativa y temperatura

Tienen la capacidad de medir la humedad relativa y la temperatura del suelo; generalmente, están cubiertos con una carcasa de acero inoxidable u otro material que los protege de las condiciones físicas y ambientales. Son instrumentos ideales para implementarlos en la agricultura.

En la actualidad, existen varios métodos que son de utilidad para determinar la humedad relativa del suelo; entre los más utilizados está el capacitivo, que se caracteriza por su fácil aplicación, la entrega de valores eléctricos y el monitoreo que realiza constantemente en diferentes profundidades.

El principio de funcionamiento de los sensores que emplean este método es el cambio en el dieléctrico del condensador, el cual es un material higroscópico (absorbe o emite humedad) que responde a la humedad después de conocer el contenido de agua en la atmosfera (Castro, 2016).

Figura 9. Sensor de humedad relativa



Fuente: Renke (2022).

Sensores de velocidad de aire

El sensor de velocidad del aire inalámbrico ALTA mide la diferencia de presión entre dos puertos de entrada; la temperatura y la altitud determinan la velocidad a la que se mueve el aire en un sistema, y transmite la medición a iMonnit. Este instrumento se caracteriza por tener integradas dos funciones:

- Rango de medición: -50 m/sa 50 m/s.
- Calibrado y compensado por temperatura.

Figura 10. Sensor de velocidad de aire



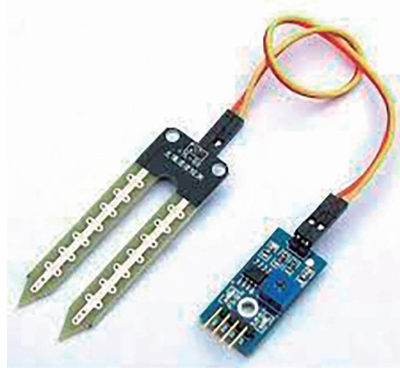
Fuente: Renke (2022).

Sensor de humedad del suelo

El sensor de humedad del suelo ALTA mide la humedad, tensión y temperatura del suelo; usa un elemento de matriz granular resistivo para medir con precisión el potencial hídrico mátrico (tensión de humedad del suelo y un elemento de temperatura basado en termistor). Entre sus principales características están (Arcos, 2021):

- Seguro de usar, tanto en temperaturas cálidas como heladas.
- Lecturas de humedad en centibar.
- 0 a 240 centibar.
- No se disuelve en el suelo.
- Compensado internamente por la salinidad que se encuentra comúnmente en niveles.
- Fácil de instalar y usar en comparación con los tradicionales tensiómetros.
- Electrodo de acero inoxidable.
- No requiere mantenimiento.
- Lecturas de temperatura en C/F.
- Cable extraíble de 5 pies.

Figura 11. Sensor de humedad del suelo



Fuente: Electrónicos (2022).

Como estos dispositivos, en el mercado se encuentran otros sensores que sirven para medir diferentes variables que pueden ser utilizados en el agro inteligente. De acuerdo con cada proyecto y aplicación específica, varían sus características y especificaciones técnicas.

En resumen, las IoT han revolucionado la forma en que realizamos las labores en nuestros hogares y ciudades, y, por supuesto, tienen aplicación en los sectores rurales colombianos para apoyar las actividades y procesos que, desde el campo, garantizan la suficiencia alimentaria en nuestro país. Adicionalmente, las IoT se conciben como un recurso para disminuir la brecha digital, contribuir al acceso de la información y permitir igualdad de condiciones y oportunidades para las personas que habitan dichos territorios.

Finalmente, la implementación de proyectos que utilicen este tipo de nuevas tecnologías en los sectores rurales contribuirá a mejorar la productividad agropecuaria, la disminución de costos de las cosechas, la tecnificación de los procesos en los cultivos para la toma de decisiones y el uso sostenible del medioambiente y los recursos naturales.

Capítulo 2. Tecnologías de redes LPWAN

El Low Power Wide Area Network (LPWAN) es un tipo de red inalámbrica diseñada para cubrir grandes distancias y transmitir mensajes de unos pocos *bytes*. La idea es enviar paquetes pequeños de información para que el dispositivo tenga el mínimo consumo energético posible. De esta forma, los dispositivos pueden mantenerse autónomos por un largo periodo gracias a su propia fuente de alimentación, típicamente una batería.

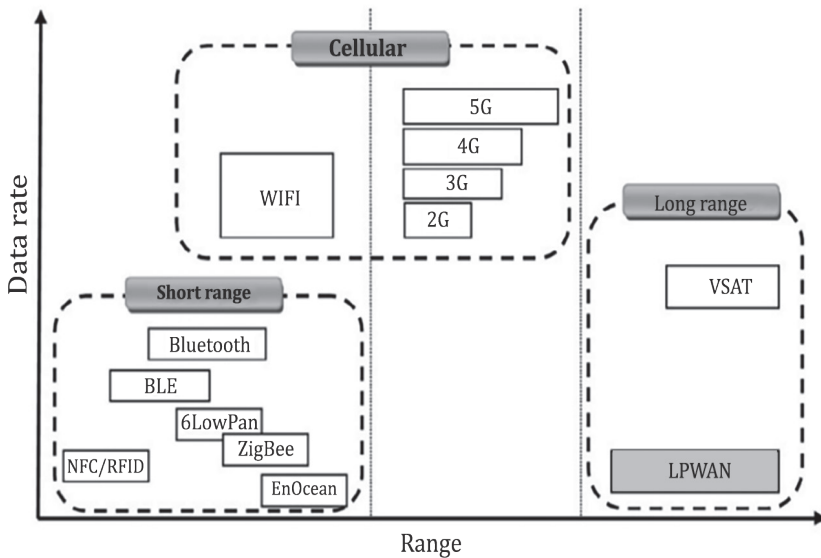
Estas redes son especialmente útiles para tareas que requieren sensores que monitoricen el estado de un entorno. Permiten colocar un gran número de dispositivos a grandes distancias y no necesitan estar conectados a una red eléctrica (Pérez-García, 2014)

Las redes con tecnologías LPWAN están ganando cada vez más popularidad en la industria y las comunidades de investigación debido a su bajo consumo, largo alcance, y características de comunicación de bajo costo. Proporcionan comunicación de largo alcance, hasta 10 a 40 km en zonas rurales, y 1 a 5 km en zonas urbanas (Centenaro, 2015). Además, son altamente eficientes desde el punto de vista energético; esto implica más de diez años de vida útil de la batería (Patel, 2017), y un bajo costo, dado que se pueden adquirir *chipsets* y herramientas para su implementación con valores cercanos a los \$10.000 (US \$3,5). Estos aspectos prometedores han impulsado

estudios experimentales recientes sobre el rendimiento de LPWAN en ambientes exteriores e interiores.

En resumen, LPWAN es muy adecuado para aplicaciones de IoT que solo necesitan transmitir pequeñas cantidades de datos en escenarios donde es requerido un largo alcance (como se muestra en la Figura 5). Muchas tecnologías LPWAN han surgido a raíz de estas condiciones que operan con pequeños anchos de banda, algunas de ellas en rangos de frecuencia de uso libre y otras que funcionan sin licencia, en diferentes frecuencias restringidas (Mekki, 2018).

Figura 12. Posicionamiento de redes con tecnologías LPWAN



Fuente: Mekki (2018).

Sigfox

Sigfox es una tecnología de banda estrecha creada en Toulouse (Francia) por el operador de red Sigfox, en el 2009. En sus inicios, su comunicación era unidireccional y se realizaba por enlace ascendente; posteriormente, evolucionó y se facilitó un canal que permite la comunicación por enlace descendente.

Una de las ventajas que presenta Sigfox es que el *hardware* utilizado para cumplir con el proceso de comunicación inalámbrica puede ser de diferentes

proveedores, teniendo en cuenta que solo utiliza una única infraestructura de red gestionada. Es un sistema que envía pequeñas e infrecuentes cantidades de datos, lo cual es suficientemente apto para utilizarlo en dispositivos como sistemas de alarma, agricultura, medidores de potencia simples y sensores ambientales (Vidal, 2021).

Es la tecnología para redes de comunicaciones LPWAN más utilizada en IoT y conocida a nivel mundial; tiene una cobertura cercana al 98 % en el territorio europeo y americano. Usa modulación Ultra Narrow Band (UNB), que le permite mitigar el ruido en la banda de 868 Mhz para Europa y 902 Mhz en Estados Unidos, con un alcance de varios kilómetros.

Uno de los beneficios que ofrece Sigfox, además de su gran rango de cobertura, es el almacenamiento de toda la información en sus servidores y la infraestructura física que ofrece a sus usuarios, lo que garantiza que sea fácilmente accesible y con un precio muy bajo para los dispositivos que se emplean en su implementación. Dispone la posibilidad de hacer uso de varias tecnologías de la nube de forma nativa, como Amazon Web Services o Microsoft Azure.

El costo energético de las transmisiones y recepciones mediante esta tecnología es muy bajo, por lo que es ideal para IoT y *Smart Rural*. La tecnología Sigfox está en capacidad de enviar pocos mensajes al día, hasta un límite de 140, y el tamaño de cada paquete es de 12 *bytes* como máximo.

Funcionamiento de la tecnología Sigfox

Sigfox define su red a partir de dos capas: el equipo de red y el soporte:

- El equipo de red sigue una topología de red en estrella formada por las estaciones base y sus antenas, lo que le permite tener puntos finales que deben cumplir con requerimientos propios para aplicaciones, por ello, es de gran importancia un bajo consumo energético y una banda de frecuencia eficiente para la transmisión de datos. Los sensores recogen los datos y los envían a la estación base que esté más cerca, una vez esta recibe los datos, los reenvía al sistema de soporte Sigfox, a través de Backend, que consiste en un túnel VPN (red privada virtual), generalmente, basado en DSL (línea de abonado digital) con LTE y satélites como respaldo. Cabe subrayar que las estaciones base utilizan esquemas de diversidad

de tiempo y frecuencia, con el fin de compensar el rechazo de los mensajes que se puedan presentar. Cuando hay varias estaciones, cada una de ellas recibe y procesa la información (Vidal, 2021).

- El sistema de soporte Sigfox se encuentra en la nube, y a través de unos servicios u oficios permite, en su mayoría, llevar a cabo el funcionamiento de la red. El sistema se divide en cuatro grupos principales. En este sentido, los servidores Backend tienen la tarea de vigilar y administrar las estaciones base con las cuales su comunicación se hace de manera directa; y que además cumplen la función de procesar la información obtenida por los sensores (envío y recepción de datos por la estación). Al respecto, es importante anotar que, si hay más de una estación que reciba el mensaje, los servidores tienen la capacidad de definir qué copia debe ser guardada.

Continuando con lo anterior, el almacenamiento es un servidor en el cual se encuentran dos bases de datos, una de ellas almacena los datos procesados por el anterior servidor y aquellos obtenidos por los dispositivos, y la otra, almacena información que caracteriza los datos concernientes a cada dispositivo.

Los servidores frontales solo realizan la comunicación con la base de datos que almacena la información, caracterizan los datos concernientes a cada dispositivo, y crean una interfaz web al usuario con el fin de que puedan administrar los dispositivos y configurar los permisos de usuario o grupo.

Los datos se comunican con las bases de datos de mensajes y a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API) basada en la notación de objetos de JavaScript (JSON); es posible recuperar los datos e integrarse con los sistemas comerciales. Finalmente, el sistema puede admitir ambas comunicaciones, tanto en el enlace ascendente como en el descendente (Vidal, 2021).

Sigfox, además, utiliza la modulación de banda ultraestrecha (UNB), que permite mayor adaptabilidad de las antenas a diferentes circunstancias y requerimientos de la tecnología; de igual modo, ofrece un ancho de banda de 100 Hz que mejora la seguridad en cuanto a interferencias que se puedan presentar. Asimismo, para la transmisión de mensajes a las estaciones base

desde los dispositivos finales, se utiliza un canal de 200 KHz, con la operación en las bandas ISM, que dependen de la zona geográfica debido a que la configuración de red puede ser diferente en cada país (Build, 2021).

El alcance de la tecnología varía según el entorno de aplicación, para zonas rurales tiene un rango de 30 km a 50 km, y en zonas urbanas de 3 km a 10 km; por último, la velocidad con que se transmiten los datos entre los diferentes dispositivos que componen la tecnología de Sigfox es de 100 bps (Krupka, 2016).

LoRa-LoRaWAN

LoRa es una tecnología que funciona con base en los efectos de su capa física y su capa de enlace de datos y modula las señales en la banda ISM¹ con la utilización de la técnica espectro ensanchado (Vangelista, 2017). Al igual que Sigfox, LoRa usa bandas ISM sin licencia, es decir, en frecuencias de 868 MHz en Europa, 915 MHz en América del Norte, y 433 MHz en Asia (Mekki, 2018). En LoRa, la comunicación se realiza en forma bidireccional a través de la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), la cual permite una propagación de la señal de banda estrecha (*narrow band*) sobre un canal sin ruido. La señal resultante, por tanto, es ampliamente resistente a la interferencia y tiene bajas pérdidas por su propagación (Reynders, 2016).

LoRa utiliza seis factores de propagación (SF7 a SF12) para garantizar el intercambio de datos y disminuir el rango de pérdidas. Un mayor factor de propagación permite mayor alcance, con una menor tasa de datos, y viceversa.

La velocidad de datos LoRa está entre 300 bps y 50 Kbps, y depende del factor de propagación y el ancho de banda del canal. Adicionalmente, los mensajes transmitidos a partir de diferentes factores de propagación se pueden recibir de forma simultánea por estaciones base de LoRa. La máxima longitud de carga útil para cada mensaje de LoRa es de 243 bytes.

1 Bandas del espectro electromagnético reservadas internacionalmente para uso no comercial, destinada a áreas industrial, científica y médica (*industrial, scientific and medical*). Las bandas ISM fueron definidas por la ITU en el artículo 5 de las regulaciones radio (RR), concretamente puntos 5.138 y 5.150.

A partir de LoRa se creó el protocolo de comunicaciones de LoRaWAN, cuya primera versión fue estandarizada por LoRa-Alliance en el 2015. El protocolo de LoRaWAN permite que cada mensaje transmitido por un dispositivo final sea recibido por todos los dispositivos de las estaciones en el rango de propagación. Con esta condición de redundancia, el protocolo de LoRaWAN mejoró la cantidad de mensajes recibidos con éxito (Petajajarvi, 2015).

No obstante, lograr este desarrollo implica múltiples estaciones base en el entorno, lo que puede aumentar el costo de despliegue de la red. Las recepciones redundantes de mensajes son procesadas en el servidor de red (*backen server*), que también requiere un nivel de procesamiento considerable para verificar los parámetros de seguridad, enviar ACK al dispositivo final y remitir los mensajes necesarios al servidor de aplicaciones.

Las recepciones redundantes en diferentes estaciones base son utilizadas por LoRaWAN para localizar dispositivos terminales. Para ello, y debido al efecto de latencia en la llegada de los paquetes, es necesario utilizar TDOA, una técnica que permite la sincronización de tiempo muy precisa entre múltiples estaciones base.

Finalmente, las múltiples recepciones del mismo mensaje en las estaciones base evitan la desconexión y pérdida de datos en la red LoRaWAN (Mekki, 2018).

NB-IoT

NB-IoT es una tecnología IoT de banda estrecha cuyo lanzamiento se realizó el 13 de junio de 2016 por el grupo 3GPP². NB-IoT puede coexistir con GSM (sistema global para comunicaciones móviles) y LTE (Long Term Evolution) en bandas de frecuencia con licencia, por ejemplo, 700 MHz, 800 MHz y 900 MHz.

NB-IoT trabaja con un ancho de banda de 200 KHz, que corresponde al rango de frecuencias de transmisión para GSM y LTE (Wang, 2016). Con la selección de esta frecuencia, se puede operar bajo los siguientes modos:

- Operación autónoma: un posible escenario es la utilización de las bandas de frecuencias GSM empleadas actualmente.

2 El grupo "3rd Generation Partnership Project" (3GPP) es un acuerdo de colaboración para el desarrollo y la evolución de especificaciones del estándar WCDMA.

- Operación en banda de guarda: utilizando el espacio no empleado por el rango de frecuencias dentro de la banda de guarda de una señal portadora LTE.
- Operación dentro de la banda: utilizando un rango de frecuencia dentro de una señal portadora LTE.

La tecnología NB-IoT puede considerarse como una nueva interfaz inalámbrica desde el punto de vista del protocolo y trabajar sobre la infraestructura LTE que ya se encuentra establecida.

NB-IoT permite una conectividad de hasta 100.000 dispositivos finales por celda con el potencial para ampliar la capacidad mediante la adición de más operadores NB-IoT. NB-IoT utiliza FDMA en el enlace ascendente y FDMA ortogonal (OFDMA) en el enlace descendente, con la modulación QPSK (Wang, 2016).

La velocidad de datos es reducida a 200 Kbps para el enlace descendente y a 20 Kbps para el enlace ascendente. El tamaño máximo de carga útil para cada mensaje es de 1600 *bytes*. Como se puede observar en Adhikary *et al.* (2016), la tecnología NB-IoT puede alcanzar diez años de vida útil con una sola batería al transmitir 200 *bytes* por día en promedio.

Finalmente, con la versión 15 del grupo 3GPP para NB-IoT se obtienen varias mejoras basadas en la inclusión de métodos de localización y servicios de multidifusión, por ejemplo, actualización de *software* de dispositivos finales, mejoras en los efectos de movilidad de los dispositivos finales, entre otros aspectos.

Funcionamiento de la tecnología NB-IoT

Con el fin de cumplir con los requerimientos de la arquitectura de NB-IoT, la arquitectura LTE fue modificada con las siguientes características (Nair, 2019).

- NB-IoT UE: establece la conexión y se comunica con eNodeB de forma inalámbrica a través de la radio.
- eNodeB: lleva a cabo el proceso de acceso a la interfaz aérea y la gestión de la célula. El eNodeB se comunica a través de la interfaz S1-lite

al núcleo de paquetes evolucionados (EPC) de la IoT. Transmite mensajes del estrato de no acceso (NAS) al EPC de la IoT para su posterior procesamiento.

- EPC de la IoT: se conecta al NAS de la UE y envía los datos a la plataforma de IoT para su posterior procesamiento.
- Plataforma de la IoT: reúne los datos de varias redes de acceso a IoT y los envía al servidor de aplicaciones.
- Servidor de aplicaciones: es el punto final de llegada de los datos que son procesados de acuerdo con las especificaciones y los requisitos del cliente.

Dado que el ancho de banda es limitado, NB-IoT puede desplegarse en tres modos diferentes: autónomo, de banda y banda de guarda. En los modos de banda y banda de guarda ocupan bloques de recursos físicos (PRB) de 180 KHz en el espectro LTE, tanto en el enlace ascendente (UL) como descendente (DL). Al respecto, se asigna como autónomo cuando ocupa el ancho de banda de 200 KHz, “rearmando” el espectro del sistema global para las comunicaciones móviles (GSM) (Mwakwata, 2019).

La tecnología NB-IoT proporciona una cobertura profunda en zonas interiores y exteriores, tiene 20 dB más en comparación con LTE y soporta una pérdida máxima de acoplamiento (MCL) de 164 dB. De acuerdo con las normas 3GPP, al reducir el ancho de banda, disminuye la velocidad de los datos, pero mejora la densidad espectral de potencia (PSD) del usuario y su cobertura. Asimismo, a la vez que incrementa el número de repeticiones en la transmisión de datos, aumenta la latencia y el consumo de energía del dispositivo. Esta tiene un rango de alcance de 1 km en zona urbana y 10 km en zona rural (Rastogi, 2020).

La velocidad máxima de transmisión de datos es de 200 Kbps y 20 Kbps en el enlace descendente y ascendente; finalmente, la vida útil de la batería puede alcanzar una duración de diez años, con una transmisión en promedio de 200 bytes por día (Mekki, 2018).

RPMA

La tecnología Random Phase Multiple Access (RPMA) es una solución patentada por la organización Ingenu, y específicamente diseñada para las comunicaciones inalámbricas en los entornos M2M sobre IoT.

Trabaja en Estados Unidos y soporta su tecnología en un acceso múltiple de fase aleatoria. RPMA opera en la banda ISM a 2,4 GHz, lo que la hace más sensible a pérdidas e interferencias; este es un limitante que la empresa que gestiona la tecnología supera con la instalación de dos antenas en sus dispositivos. Puesto que la longitud de onda de la banda 2,4 GHz es menor, es posible diseñar antenas de menor tamaño.

Debido a esta característica, el alcance de esta tecnología es menor y por tanto la cobertura se reduce en comparación con otros protocolos que usan las bandas por debajo de 2,4 GHz. Esto se puede traducir en una menor cantidad de dispositivos por estación base.

Al igual que LoRa, RPMA es capaz de soportar una transmisión bidireccional de forma efectiva, con unas velocidades de hasta cientos de miles de *bits* por segundo, a costa de un mayor consumo de energía que sus competidores. En cuanto al tamaño de los paquetes que puede enviar, estos pueden variar desde los 6 *bytes* hasta los 10 *Kbytes* (Pardal, 2017).

M2M

Las redes M2M son apoyadas por grandes empresas de telecomunicaciones. Están basadas en el modelo de negocio del General Packet Radio Service (GPRS) (GPRS Technology, 2011), donde se paga por *Mbyte* transmitido; de forma similar a las tecnologías 3G/4G.

Sin embargo, en un sistema en el que hay miles de dispositivos conectados, su desventaja se encuentra en la dificultad que tiene para que sea escalable. Posee una cobertura asociada a un operador, y esto genera unos costos adicionales por datos transmitidos.

Además, las transmisiones de datos suponen un costo energético, a menudo asumido por la mayoría de los dispositivos pensados para IoT. Las redes M2M son las más comercializadas en el mundo IoT; sin embargo, en un

futuro próximo puede haber un declive en su uso frente a las tecnologías con modulación NarrowBand (Múnera, 2018).

NB-Fi

NB-Fi es una tecnología de comunicación patentada por WAVIOT similar a Sigfox. Opera en las bandas ISM libres por debajo del gigahercio con una modulación DBPSK a una tasa de transmisión entre 10 bps y 100 bps. Utiliza canales estrechos de 100 Hz de ancho de banda, similar al UNB de Sigfox.

La cobertura que aporta esta tecnología es superior a la de sus competidores del mercado LPWAN. Pese a utilizar la misma modulación y bandas de frecuencias similares para la comunicación, consigue tener más alcance al usar dispositivos con mayor potencia de transmisión.

De esta forma, su alcance máximo queda fijado alrededor de los 16 km para entornos urbanos con un consumo de 166 dBm. En entornos rurales, puede alcanzar hasta los 50 km (Pardal, 2017).

ETSI LTN

El grupo de estandarización ETSI ha especificado su propia tecnología de comunicación, denominada Low Throughput Network (LTN), para el sector IoT. Viene definida en tres documentos: casos de uso para LTN de acuerdo con arquitecturas funcionales y protocolos e interfaces. Esta tecnología tiene algunas características que la diferencian de las existentes en el sector.

Permite una comunicación bidireccional de largo alcance de hasta 40 km en entornos libres de obstáculos. Trabaja con un consumo reducido de energía, dando lugar a una elevada vida útil, e incluye un sistema de procesamiento de la señal de radio para evitar problemas con las interferencias. Como canal de subida (*Uplink*), trabaja en la banda ISM libre del sub-GHz 868-868,60 MHz, con un ancho de canal de 100 Hz. El esquema de modulación es BPSK; su velocidad de modulación es de 100 baudios.

Por otro lado, la norma específica que el canal de bajada (*Downlink*) emplea corresponde a la banda de 869,40-869,65 MHz. El esquema de modulación utilizado es GFSK, con un ancho de canal variable a una velocidad de modulación de 600 baudios.

Finalmente, la potencia de transmisión es limitada. En el caso del enlace de subida, las regulaciones de la región fijan este límite (típicamente, 25 mW), mientras que, en la comunicación de bajada, la potencia está limitada a 500 mW (Pardal, 2017).

LTE-M (eMTC). Grupo 3GPP

El grupo “3rd Generation Partnership Project” (3GPP) es un acuerdo de colaboración para el desarrollo y la evolución de especificaciones del estándar WCDMA. Este grupo ha estandarizado varias tecnologías de comunicación, integrándolas en versiones como 3G. Dentro del contexto del IoT, 3GPP ha diseñado en los últimos años varios modelos de comunicación:

- LTE Cat 1: es la versión 8 del grupo, publicada en el 2008. Fue la primera en implantar la tecnología LTE, y aunque no fue inicialmente diseñada para el contexto del IoT, sus prestaciones pueden permitir el despliegue de aplicaciones.
- LTE Cat 0: es la versión 12 del grupo y fue publicada en el 2015. Aporta mejoras frente a la primera versión de LTE, pero sin ser aún específica para el mundo del IoT.
- LTE Cat M1 (eMTC): es una de las estandarizaciones de la versión 13 y fue publicada en el 2016 pensando en aplicaciones hacia el mundo IoT y M2M.
- LTE Cat NB1 (NB-IoT): fue publicada en el 2016 y conforma una de las estandarizaciones de la versión 13. Al igual que eMTC, su desarrollo fue focalizado hacia el IoT.

Todas ellas, basan su funcionamiento en las actuales redes celulares, en las que se pueden aprovechar sus estaciones base y la infraestructura ya desplegada. Como su nombre indica, utilizan la tecnología LTE (Pardal, 2017).

Weightless

Weightless es una de las tecnologías de comunicación más usadas en el ámbito IoT y da nombre al propio grupo que la regula, Weightless SIG. Este grupo es una organización de estándares sin ánimo de lucro formada para

coordinar esta tecnología en el mundo IoT. Se define como una tecnología LPWAN de estándar abierto, que ofrece gran cobertura, larga duración de las baterías y un reducido coste de fabricación de dispositivos.

Dentro del propio grupo, ofrecen tres variantes de la tecnología: Weightless-N, Weightless-P y Weightless-W, en orden de menor a mayor complejidad (Pardal, 2017).

Figura 13. Comparación de las tecnologías Weightless

	Weightless-N	Weightless-P	Weightless-W
Directionality	1-way	2-way	2-way
Feature set	Simple	Full	Extensive
Range	5 km +	2 km +	5 Km +
Battery life	10 years	3-8 years	3-5 years
Terminal cost	Very low	Low	Low-medium
Network cost	Very low	Medium	Medium

Fuente: Pardal (2017).

DASH7

La DASH7 Alliance es un consorcio que define la tecnología de comunicación DASH7 Alliance Protocol (D7AP) dentro del ámbito de las LPWAN, en el que se proporciona conectividad de alcance medio para actuadores y sensores de baja potencia. D7AP utiliza un esquema de modulación de banda estrecha con GFSK en las bandas ISM, libres por debajo del gigahercio.

En comparación con el resto de las tecnologías de comunicación, DASH7 obtiene una menor latencia debido a su ciclo de funcionamiento, por el cual comprueba el canal periódicamente. Pese a su mejora en latencia, presenta un aumento en el consumo de energía, cuestión de vital importancia en el ámbito IoT. Con sus características, D7AP permite un alcance de hasta 5 km en entornos urbanos, con unas tasas de transferencia de decenas de Kbps.

IEEE 802.11ah

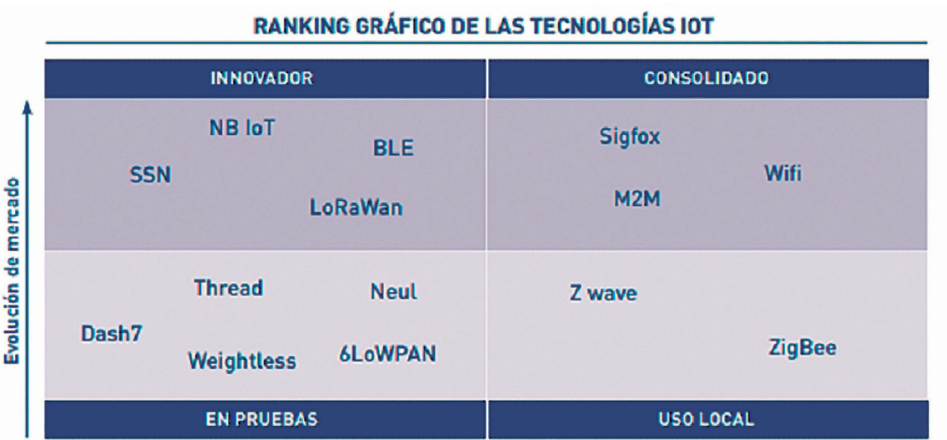
IEEE 802.11ah, más conocido como Wifi-HaLow, fue desarrollado por el conocido grupo IEEE como una especificación para aplicaciones de IoT. Su proceso de normalización comenzó en noviembre del 2010 y se publicó en el 2016.

Esta tecnología opera en las bandas de sub-GHz exentas de licencia, en contraposición a las frecuencias de 2,4 y 5 GHz que trabajan el resto de las especificaciones de la norma 802.11, mediante la técnica de transmisión OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales). De este modo, la velocidad de transmisión de datos va desde los 150 Kbps hasta los 346 Mbps, y llega a alcanzar distancias en torno de 1 km (Pardal, 2017).

Comparación entre tecnologías LPWAN

En la Figura 14 se muestra una clasificación de las principales tecnologías mencionadas anteriormente, según su facilidad de uso y evolución en el mercado (Efor, 2017).

Figura 14. Comparación de las tecnologías de red según su evolución de mercado y facilidad de uso

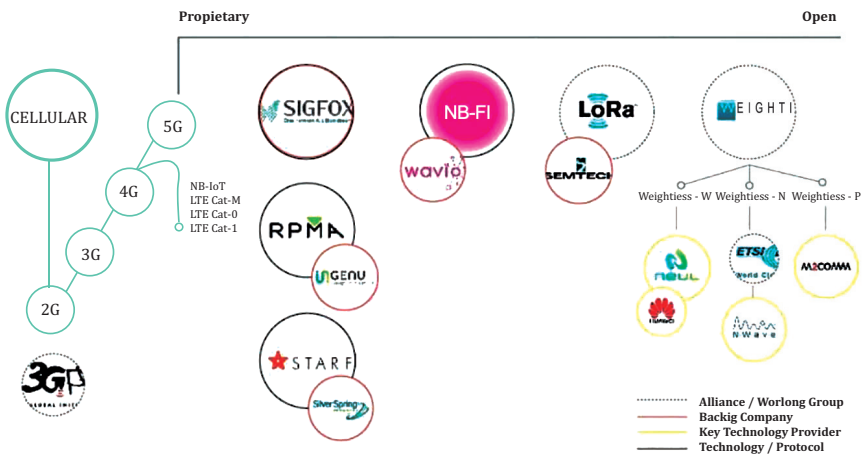


Fuente: Efor (2017).

Adicionalmente, se puede observar en la Figura 15 el estado actual del mercado en cuanto a tecnologías de LPWAN e IoT se refiere (Pardal, 2017).

Teniendo en cuenta la descripción general de las tecnologías que son más utilizadas en aplicaciones donde se requiere ciertos parámetros de velocidad, cobertura, tiempo de respuesta, entre otros, a continuación, se presenta un cuadro comparativo.

Figura 15. Situación del mercado IoT



Fuente: Pardal (2017).

Tabla 1. Comparación de las tecnologías de comunicación LPWAN-IoT

Parámetros	Zigbee	Lora Wan	Sigfox	NB-IoT
Tipo de modulación	BPSK/OQPSK	GFSK	DBPSK(UL), GFSK(DL)	QPSK
Banda de frecuencia	868/915 MHz y 2,4 GHz	869/915 MHz	868/915 MHz	Bandas de frecuencia LTE con licencia
Ancho de banda del canal	2 MHz	< 500 Hz	< 100 Hz	200 KHz
Velocidad de datos	20, 40 y 250 Kbps	50 Kbps	100 bps	200 Kbps
Latencia	15 ms	1-10 ms	190-350 ms	10-13-18 y 21 ms
Rango de comunicación	100 m, XBee Pro S3B (45 km)	5 km (urbano), 20 km (rural)	10 km (urbano), 40 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Longitud máxima de datos	127 bytes	243 bytes	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	1600 bytes
Capacidad de seguridad	128 bits AES	AES 128 bits	AES 128 bits	LTE encriptación
Número de mensajes por día	Ilimitado	Ilimitado	140(UL), 4(DL)	Ilimitado

Parámetros	Zigbee	Lora Wan	Sigfox	NB-IoT
Consumo de energía en modo tx	36,9 mW	100 mW	122 mW	110 mW
Topología de red física	P2P, árbol, estrella, malla	Estrella	Estrella	Maestro/esclavo
Trasmisión	Half-Duplex	Half-Duplex	Limitado/ Half-Duplex	Half-Duplex

Fuente: Vidal (2021).

En conclusión, las redes LPWAN con características técnicas de bajo consumo y amplia cobertura, que a diferencia de otras redes de comunicaciones de elevada capacidad en ancho de banda están enfocadas en la transmisión de paquetes pequeños de datos entregados por sensores y actuadores en los cultivos, constituyen un elemento de gran importancia para el despliegue de proyectos relacionados con el agro inteligente. Su instrumentalización contribuirá no solamente al desarrollo tecnológico en el campo, sino que tendrá impacto en el ámbito social, especialmente en los sectores rurales, tradicionalmente golpeados por la violencia, y con limitaciones para su bienestar y desarrollo con equidad territorial.

También, las tecnologías LPWAN aportan, desde lo tecnológico, en la reducción del uso y menor disposición de energía eléctrica para alimentar una red inalámbrica de sensores (WSN) que puede funcionar con baterías de ion-litio para una estación (*Gateway*) por un término de dos a cinco años, sin ningún otro tipo de consumo. Esto, finalmente permite una cobertura de red de varios kilómetros (61 km en pruebas realizadas en territorios colombianos) y costos relativamente bajos (una estación se puede construir con menos de US \$20).

Capítulo 3. Contexto y desarrollo de Smart Agro

En los últimos años, el término *Smart Rural* ha estado cada vez más presente en medios de comunicación, estudios e iniciativas institucionales. En este concepto, se habla de pueblos conectados, agricultura de precisión o *Smart Agro*, de tecnologías como el *big data* o aplicaciones móviles destinadas a los consumos eficientes y el aumento de la productividad, el turismo rural inteligente, las redes colaborativas de emprendimiento, las plataformas en línea de gestión administrativa, las redes de interconexión a bajo costo, la infraestructura, la tecnología, IoT para el campo, entre muchas otras.

La aplicación de nuevas tecnologías y tendencias mundiales de las TIC al sector rural es clave para estos tiempos. Autores como Amandeep *et al.* (2017) muestran cómo hoy en día diferentes países en desarrollo han utilizado la combinación de métodos tradicionales y tecnologías modernas, como IoT, aplicadas al sector agropecuario; en este proceso, destacan los importantes avances a los que se ha llegado mediante la integración de propuestas novedosas, así como el aumento de la producción y su eficiencia.

Las tecnologías de agricultura inteligente para el desarrollo agrícola sostenible proporcionan información innovadora sobre los últimos avances en agricultura en términos de informática y comunicación. Al respecto,

Poonia (2001) presenta temas como los sistemas de sensores, la comunicación inalámbrica y la integración de IoT en los procesos relacionados con la agricultura.

Hoy en día es habitual encontrar invernaderos totalmente automatizados, en los cuales los nodos de IoT equipados con sensores recopilan información y datos de carácter ambiental, que son de mucha importancia para la toma de decisiones en fases que van desde la siembra hasta la cosecha, y que, a través de una etapa de análisis de datos, controlan automáticamente actuadores para ajustar algunas variables, como la humedad del aire (Danita *et al.*, 2018) o los niveles de humedad del suelo (Rajalakshmi, 2016).

También, se han implementado redes de sensores inalámbricos (WSN) o sistemas similares a cultivos en campo abierto (Codeluppi *et al.*, 2019) y en procesos de gestión ganadera (The Things Network, 2020). En un futuro cercano se espera que las fincas o granjas altamente tecnológicas sean cada vez más comunes.

Los procesos de transferencia tecnológica hacia el sector agrícola, generalmente asociados con términos como la agricultura inteligente o agrointeligente, son vistos por varias entidades gubernamentales, como la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), como factores clave para abordar eficazmente las tendencias futuras (FAO, 2017). En este libro se plantea la necesidad de una agricultura optimizada y más sostenible para el medioambiente, con el fin de apoyar el crecimiento de la población mundial, evitar los efectos nocivos del cambio climático y preservar el agua y los recursos naturales.

Con el objetivo de apoyar esta transformación, la Comisión Europea (CE) ha financiado varios proyectos relacionados con la agricultura inteligente, como AFarCloud (www.afarcloud.eu), y la adopción de IoT en el sector agrícola (<https://www.iof2020.eu/>).

Adicionalmente, el IoT se convierte en el elemento integrador y esencial para el trabajo en la agricultura inteligente, dado que tiene importantes proyecciones y aplicaciones en un futuro inmediato.

En primer lugar, el sector agrícola tiene que ser monitoreado y controlado continuamente, lo que genera una gran cantidad de datos, por ejemplo,

parámetros ambientales relevantes para un crecimiento adecuado de las plantas en un cultivo, que efectivamente necesitan ser recolectados, transferidos, procesados y almacenados. En la mayoría de los casos, el despliegue de redes de datos que generen conectividad en el campo permite el intercambio de información entre nodos de una arquitectura IoT; allí, el uso de fuentes de energía (por ejemplo, energía solar) es fundamental para alimentar este esquema.

Debido a que en los campos agrícolas generalmente no se dispone de un suministro de energía por cable y la cobertura de red es muy limitada, es necesaria la implementación de dispositivos IoT basados en redes LPWAN que permitan su conectividad en ámbitos comunitarios con internet, y que además garanticen un consumo de energía muy bajo.

Como se mencionó, la agricultura moderna enfrenta nuevos desafíos tecnológicos que requieren transformaciones para hacer frente a las nuevas tendencias y requisitos a nivel mundial. La FAO estima que la población mundial alcanzará 9,73 mil millones para 2050 y 11,2 mil millones para 2100 (FAO, 2017); además el planeta cuenta con una población actual superior a los 8,1 mil millones de personas (octubre de 2024) (Worldometer, 2024).

Como consecuencia lógica, una mayor producción de alimentos será obligatoria. Además, los cambios en los patrones climáticos y de consumo alimenticio intensificarán el uso de recursos naturales, exacerbando problemas críticos como la escasez de agua, la degradación de la tierra y la deforestación. Otros problemas están relacionados con la seguridad alimentaria (la calidad y la trazabilidad de los alimentos), ya que la sobreexplotación de los recursos naturales y los factores de cambio climático conducirán a una alimentación menos nutritiva y entornos favorables para los patógenos transmitidos por los alimentos y el agua, lo que intensificará el uso de pesticidas y, en consecuencia, riesgos potenciales para la salud de las personas.

Por tanto, los elementos fundamentales para dar solución a estas problemáticas serán el uso de tecnologías aplicadas a la agricultura (agro inteligente o *Smart Rural*). Dado que el sector agrícola se caracteriza por ciertos factores de imprevisibilidad, heterogeneidad y complejidad, se puede comprender de mejor forma el comportamiento de muchas variables que intervienen en los procesos agrícolas gracias a los procesos de monitoreo, medición y análisis

de sus parámetros físicos, químicos y ambientales. Esto será posible gracias a la adopción de IoT y las tecnologías relacionadas con el agro inteligente en los entornos rurales.

Asimismo, en países de Europa y África se ha implementado tecnología de punta aplicada a la agricultura para fortalecer la producción agrícola y facilitar el uso adecuado del agua. En España, por ejemplo, la empresa Oriones de España trabaja en sistemas de telecontrol con sensores para automatizar sistemas de riego que contribuyan a aumentar la producción y minimizar el impacto en el uso del agua (Orionis, 2021).

Una empresa de investigación en el área agrícola, que hace parte de un consorcio entre Telefónica y Vertical Green, se ha encargado de desarrollar proyectos para la “agricultura conectada” que buscan facilitar el control de las cosechas y el comportamiento de los cultivos de forma remota a través de dispositivos conectados a internet. Este proyecto se dio a conocer en el 2022, con la obtención de datos relacionados con temperatura, humedad o iluminación que son captados en sectores rurales por una red de sensores (WSN), y que alimentan la plataforma de Telefónica, Kite Platform. Esta última, analiza la información mediante el uso de algoritmos para garantizar la gestión eficiente de los recursos empleados en el sector y procura mejoras en la producción de los cultivos (Telefónica, 2022).

Asimismo, en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), se realizó un convenio con Vertical Green para adelantar una investigación sobre los cultivos de fresa que busque mejorar su calidad, eficiencia en el uso del agua y procure aplicar los conceptos de sostenibilidad en su producción (Tech, 2020).

En África, también se han implementado iniciativas tecnológicas de aplicación de IoT en prototipos de plataformas con sensores de humedad, acidez y ph, además de sensores de luz ambiental y de temperatura para medir las condiciones naturales y proporcionar información importante del suelo, y de esta manera, incentivar la utilización de fertilizantes que permitan la implantación de cultivos en terrenos favorables para la agricultura (Olivera-Jr, 2020).

Por otra parte, en el 2022, en Israel, surgió una *startup* denominada “Crop X”, que utiliza sensores en los terrenos cultivables, como el sensor NPK, y obtiene datos de nitrógenos, fósforo y potasio, para determinar la fertilidad del suelo y la adaptación de los cultivos en las zonas definidas por el Ministerio

de Economía e Industria; simultáneamente, este instrumento utiliza sensores meteorológicos para alertar a los dueños de granjas sobre los posibles fenómenos que puedan afectar los cultivos con la posible reducción de pérdidas económicas ante circunstancias meteorológicas adversas (Industry, 2019).

En Colombia se ha avanzado en la aplicación de los conceptos de agricultura inteligente y agricultura de precisión en cultivos de café (Urbano-Molano, 2013), caña de azúcar (Orozco y Llano, 2016) y fresa (Sierra y Bustos, 2019) en diferentes regiones del país (llanos orientales, Eje Cafetero y Valle del Cauca). Sin embargo, una de las principales dificultades que hay es la falta de cobertura tecnológica y conectividad a internet, para poder transmitir la información desde los sectores rurales hacia las cabeceras municipales, donde se encuentran los puntos que hacen parte del Plan Vive Digital implementado por el Ministerio de las TIC y otras instituciones del gobierno en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014.

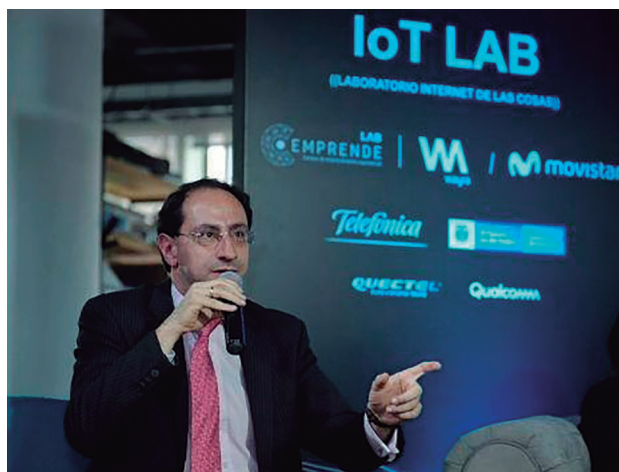
Entretanto, el Ministerio de las Tecnologías de la Información y el conocimiento (MinTIC) y el Consejo Nacional de Políticas Económica y Social (Conpes), impulsaron la utilización de tecnologías emergentes, con la publicación de los documentos Conpes 3975, 3988 y 4023, que promueven los procesos de transformación digital, inteligencia artificial, *big data* e IoT en diferentes territorios colombianos, incluidos los sectores rurales del país.

A su vez, en el 2020, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se realizó un estudio en el que se integran aplicaciones de agro inteligente e IoT en cultivos de papa en varios entornos rurales, y se modelan procesos mediante series de tiempo ARIMA y SARIMA, para realizar predicciones tendientes a establecer el tráfico futuro de datos en la red inalámbrica, donde se encuentran vinculados los conjuntos de dispositivos de sensores de humedad CF28-ESP8266. Asimismo, esta investigación ha permitido realizar los cálculos para rediseñar la capacidad de procesamiento y el ancho de banda requerido en la red para el funcionamiento adecuado en una implementación a mayor escala en este tipo de cultivos (López *et al.*, 2020).

Finalmente, gracias a la intervención de empresas privadas, en un proyecto de Movistar y Wayra, en alianza con otras entidades colombianas, se realizó el lanzamiento del primer Laboratorio de Internet de las Cosas (IoT LAB), que tiene el objetivo de permitir el desarrollo de herramientas y aplicaciones

que faciliten la implementación de tecnologías en el campo y la ciudad. Un ejemplo de este esfuerzo fue la iniciativa por parte de Agrum y Celoro, empresas del sector agropecuario, que desarrollaron una aplicación que permite el monitoreo y seguimiento de bovinos en celo a través de la implantación de un chip y un arnés colocado a los animales. Este dispositivo emite alertas y detecta cuando las hembras están en estado de celo; su objetivo es mejorar la cría y reproducción de los ejemplares.

Figura 16. Lanzamiento del primer laboratorio de IoT en Colombia



Fuente: Wayra/Movistar/Cemprende (2019).

Asimismo, en el municipio de Ventaquemada (Boyacá), en el 2018, la asociación de paperos del municipio llevó a cabo una prueba piloto, con apoyo de la empresa Movistar, para la implementación de una red de sensores que miden variables ambientales, como temperatura, acidez del suelo, humedad, entre otras, con el objetivo de controlar los cultivos y optimizar su producción. Cerca de 38 familias que participaron en el proyecto obtuvieron un aumento cercano al 50 % en la producción y una reducción de los costos alrededor del 22 % de insumos y demás productos utilizados en la cosecha (Movistar, 2020).

También, en el 2019, en el departamento de Nariño, se puso en marcha un ecosistema tecnológico, compuesto por sensores para medir la humedad del suelo y el ambiente, la radiación, la dirección de viento y el nivel de lluvias, y una estación meteorológica conectada a una red IoT para realizar

seguimiento a los cultivos de café, y de esta forma aumentar la producción del grano por hectárea, además de incrementar la rentabilidad del cultivo en cerca del 40 % comparado con la producción tradicional (Radio, 2020).

Figura 17. Proyecto para beneficiar a familias caficultoras en Nariño



Fuente: Agronegocios (2022).

Por último, como un aporte al conocimiento, en la Universidad del Cauca, en un convenio con la empresa Omicron de Medellín, se utilizaron dispositivos Datalog X-PRO en una red inalámbrica de sensores para medir el nivel de lluvias, radiación solar, temperatura, velocidad, dirección del viento y condiciones del suelo. Esta información se envía a la nube para ofrecer mecanismos de control y monitoreo de los cultivos en territorios cafeteros; los datos se emplean como instrumento para mejorar su productividad (Universidad del Cauca, 2019).

Cabe anotar que los conceptos de agro inteligente (*Smart Agro*) cada vez adquieren mayor relevancia en los contextos regionales, nacionales e internacionales, por su capacidad de fortalecer el sector agropecuario y promover el uso de tecnologías emergentes en el campo, dado que hacen parte de las políticas de inclusión social, que tienen como objetivo construir un futuro digital para todos los colombianos. Asimismo, se encuentran alineados con retos establecidos en las políticas de investigación e innovación, que se proponen aumentar y mejorar la producción de alimentos y agua de manera eficiente, soberana y autónoma por medio de la investigación y la innovación.

Simultáneamente, este tipo de proyectos basados en el agro inteligente permiten potenciar el desarrollo territorial sostenible mediante el conocimiento, la conservación y el aprovechamiento de la biodiversidad y sus bienes y servicios ecosistémicos.

Asimismo, los proyectos basados en la aplicación de conceptos de agro inteligente pueden aportar significativamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la comunidad internacional, específicamente en temas relacionados con la suficiencia alimentaria y las acciones para controlar los efectos del cambio climático, con la protección de la vida en los ecosistemas terrestres (Objetivos 2, 13 y 15).

Capítulo 4. IPv6 como estrategia de seguridad *Smart Agro*

IPv6 es un protocolo de la capa de red que se debe implementar no solo en ciudades inteligentes, sino en la data que se requiere para la transferencia de información en las futuras redes 5G en el país. Es importante que en el sector rural se integre, pues gracias a él y a su set de seguridad se puede proteger la información que viaja a través de las redes IoT y su conectividad a la nube.

Características funcionales del modelo e interacción con IPv6

El modelo de investigación para redes rurales, base fundamental de la agricultura inteligente, está en constante cambio. Es el lugar perfecto, al ser un laboratorio IoT real, para implementar y probar nuevos protocolos de enrutamiento, sistemas operativos, *software* libre para aplicaciones y el nuevo estándar de direccionamiento IPv6 (Deering y Hinden, 2007).

De allí la importancia de usar *routers* y *switchs* que posibiliten la integración de este importante protocolo en la conectividad que tiene la red a redes de telefonía celular, ya que estas están ampliamente difundidas en las zonas rurales de nuestro país. Esto demuestra, a futuro, la necesidad de contar con un bloque de direcciones que permita desarrollar actividades científicas e

investigativas y que promuevan la migración y el uso del direccionamiento mediante protocolos IPv6 (Sang-Do Lee, 2007). La gestión se realiza ante el Registro de Direcciones de Internet de América Latina y Caribe (Lacnic), que es el ente encargado para Latinoamérica de asignar los diferentes bloques de direccionamiento.

Protocol Next Generation (IPng) IPv6

A principios de la década de 1990, el Internet Engineering Task Force (IETF) comenzó a trabajar para desarrollar un nuevo protocolo que resolviera, en primer lugar, el problema de saturación de direcciones de IPv4 y adicionara a este nuevo protocolo algunas características que no se contemplaron en su diseño. Por su parte, en noviembre de 1992, surgió una nueva área de investigación llamada Internet Protocol Next Generation (IPng), comisionada por el IETF para formalmente estudiar las diferentes propuestas para el desarrollo de este nuevo protocolo (Deering y Hinden, 2007).

En diciembre de 1993 fue distribuido el RFC 1550 (Bradner, 1993), el cual invitaba a todas las partes interesadas a participar con comentarios acerca de cualquier requerimiento específico que consideraran pertinente incluir durante el proceso de selección de IPng.

En el RFC 1726, el grupo de investigación definió un conjunto de 17 criterios que serían usados para el proceso de evaluación del IPng:

- Escalabilidad: el nuevo protocolo debería ser capaz de identificar y direccionar por lo menos 1012 sistemas finales y 109 redes individuales.
- Flexibilidad topológica: la arquitectura de enrutamiento y protocolos para IPng debería permitir la utilización de muchas topologías distintas de red.
- Rendimiento: para IPng, los *host* deberían ser capaces de transferir datos a tasas comparables a las alcanzadas con IPv4, con niveles similares de recursos máquina.
- Servicio robusto: el servicio de red junto con los protocolos de control y enrutamiento para IPng debería ser suficientemente robusto.

- Transición: deberían existir mecanismos para realizar la transición de IPv4 hacia IPng de manera transparente; esto, para los protocolos y las aplicaciones de las capas superiores.
- Independencia del medio: este nuevo protocolo debería trabajar a través de internet con diferentes medios LAN, WAN y MAN, así como con distintas velocidades de conexión, que van desde algunos bits/segundo hasta cientos de giga bits/segundo.
- Servicio de datagramas no confiables: el nuevo protocolo debería soportar un servicio no confiable de entrega de datagramas.
- Configuración, operación y administración: este nuevo protocolo también debería permitir conexiones fáciles, además de operación y configuración ampliamente distribuida. También, permitir la configuración automática de *host* y enrutadores.
- Operación segura: IPng también debería proveer una capa de red segura (IPSec).
- Acceso y documentación: los protocolos que definen a IPng, así como sus protocolos asociados y de enrutamiento, deberían ser publicados en los RFC, así como estar disponibles libremente y no requerir licencia para su implementación.
- Nombrado único: IPng debería asignar a todos los objetos de la capa IP de manera global nombres de internet únicos.
- Multicast: IPng debería soportar transmisión de paquetes *unicast* y *multicast* que a su vez soporten aplicaciones como transmisiones de *media streaming*.
- Extensibilidad: IPng debería ser capaz de evolucionar para cubrir las necesidades futuras de internet. Asimismo, conforme este evolucione, tendría que permitir diferentes versiones de él, que puedan coexistir sobre la misma red.
- Servicio de red: IPng debería permitirle a la red asociar paquetes con clases de servicio en particular y proveerlas con los servicios especificados por esas clases.

- Movilidad: el protocolo debería soportar huéspedes, redes e inter redes móviles.
- Protocolo de control: el protocolo debería incluir soporte elemental para probar y depurar redes.
- Redes privadas: por último, IPng debería permitir a los usuarios construir redes privadas sobre la infraestructura básica de red, que soporten ambas redes, basadas o no en IP.

De acuerdo con los criterios anteriores, varias propuestas fueron revisadas, y en enero de 1995, el RFC 1752 fue publicado como resultado. En este, se resumían las evaluaciones hechas a tres propuestas para el IPng:

- Arquitectura común para el protocolo de internet de siguiente generación (CATNIP).
- Protocolo de internet simple plus (SIPP).
- TCP/IP con direcciones más grandes (TUBA).

A su vez, CATNIP proponía una concordancia entre internet, OSI y los protocolos Novell. Para lograrlo, integraba protocolos de red como IP, Novell's Internetwork Packet Exchange (IPX) e ISO Connectionless Network Protocol (CLNP). El diseño de CATNIP permitía un gran número de protocolos de transporte, como el ISO Transport Protocol, class 4 (TP4), Connectionless Transport Protocol (CLTP), TCP, UDP, y Novell's Sequenced Packet Exchange (SPX); sin embargo, los revisores de esta propuesta sintieron que CATNIP solo cumplía con cinco de los criterios establecidos, dos más no eran cumplidos y no tenían conclusión acerca de los criterios restantes (Moreno, 2004).

SIPP, por su parte, planteaba una evolución a IPv4, por esto, todas las funciones de IPv4 que les parecieron buenas fueron mantenidas en su nueva propuesta; también, fue aumentado el tamaño de las direcciones de 32 a 64 bits de longitud, y lo mejor de todo, su instalación sería como una actualización de *software*. SIPP además sería interoperable con IPv4. En cuanto a esta propuesta, los revisores decidieron que SIPP cumplía con diez de los criterios clave, dos criterios no se cumplían y no tenían conclusión acerca de los criterios restantes.

TUBA, en cambio, proponía reemplazar IPv4 con CLNP, lo cual traía consigo dos beneficios inmediatos: incremento en el espacio de direcciones y acceso a protocolos de la capa de transporte para operar de manera transparente. Los revisores de TUBA determinaron que esta propuesta cumplía con cinco de los criterios clave, no cumplía un criterio y no tenían conclusión acerca de los criterios restantes.

Como resultado de las revisiones a estas tres propuestas, se decidió elegir a SIPP, incorporarle direcciones de 128 bits de longitud y hacer algunas otras modificaciones. El resultado final, después de todas estas reformas, es lo que se conoce como IPv6 o IPng (Moreno, 2004).

De acuerdo con lo anterior, y a las pautas adoptadas por la red clara sobre IPv6 y en las regionales de los diferentes países, se definió que las redes rurales requieren un *pool* de direcciones que permita la conexión a futuro con todo tipo de redes. De esa forma, no quedaría relegada a posibles ataques por no contar con seguridad en los paquetes que viajan por la red. Al implementar IPSec, fue posible disminuir los posibles ataques a esta herramienta (Jara *et al.*, 2014).

Cabecera IPv4 vs. IPv6

Después de una década del lanzamiento de IPv6 se evidenció la necesidad de implementar un protocolo debido a las mejoras sobresalientes comparadas con su antecesor; a continuación, se realiza una breve comparación entre la cabecera que trabaja IPv4 y la de IPv6. Al respecto, se tienen en cuenta los cambios efectuados y las características más relevantes.

La longitud mínima del encabezado o cabecera de IPv4 es de 20 *bytes*. Además, hubo campos que se modificaron o eliminaron en el encabezado en la versión 6 de IP. Esta característica se puede apreciar en la Figura 18.

La razón por la cual algunos campos se eliminaron es la redundancia que se maneja en IPv4 y que es innecesaria en IPv6; como el *Checksum* o verificación de integridad de la cabecera, que ahora está contenida en otros mecanismos de encapsulado, como IEEE 802MAC y la capa de adaptación ATM.

Por su parte, el campo de “desplazamiento de fragmentación” se eliminó debido a que el mecanismo por el que se realiza la fragmentación de los

paquetes es diferente en IPv6; al respecto, este campo no prestaba utilidad alguna. En IPv6, la fragmentación y desfragmentación se realiza de extremo a extremo.

Figura 18. Comparación de la cabecera IPv6 e IPv4

Características	IPv4	Ipv6
Dirección	32 bits de longitud (4 bytes)	128 bits de longitud (16 bytes)
Tiempo de vida máximo de la dirección	Gestionadas por DHCP	Las direcciones IPv6 tienen dos tiempos de vida: el preferido y el válido. El tiempo de vida preferido siempre es <= válido
Máscara de dirección	Es usada para designar la red desde la parte del sistema principal	No aplica
Tamaño de los paquetes	576 bytes requeridos	280 bytes requeridos
Fragmentación de los paquetes	A través de routers y host de envío	Solo a través de host de envío
Broadcast	Sí	No
Cabecera IP	Longitud variable de 20-60 bytes	Longitud fija de 40 bytes
Conexión LAN	Hasce uso de la conexión LAN para acceder a la capa física	IPv6 puede ser usado con cualquier adaptador Ethernet y también soporta conexión a través de Ethernets virtual entre particiones lógicas
Filtrado de paquetes	Es un conjunto de funciones básicas de cortafuegos integradas en TCP/IP	El filtrado de paquetes no da soporte al IPv6
Administración de subredes locales	Internet Group Management Protocol (IGMP)	Multicast Listener Discovery (MLD)

Fuente: Solvetic (2009).

Asimismo, la longitud total pasó a ser ahora la “longitud de carga útil” (*payload length*), que es la longitud de los datos como tal, y que puede llegar a ser de 65,536 bytes, con una longitud de 16 bits.

El protocolo ahora es la “siguiente cabecera” (*next header*). Debido a que en la actualización se emplean cabeceras encadenadas y no de longitud variable, ya no es necesario utilizar un campo para opciones; además, este

campo ni siquiera es procesado por los *routers*, sino solo en los extremos. Este campo de siguiente cabecera tiene una longitud de 8 bits. El tiempo de vida ahora es el “límite de saltos” (*hop limit*), y tiene una longitud de 8 bits.

Existen también campos nuevos, que son los que manifiestan los cambios más notorios con respecto a IPv4, o mejor, las características principales de IPv6 como calidad de servicio (QoS), clase de servicio (CoS) y un control de flujo y de prioridades, según los tipos de servicios (Ferro, 2016).

Estos campos de novedad son la clase de tráfico (*traffic class*) o prioridad, que podría ser equivalente a lo que en IPv4 hacía el campo *Type of Service* (TOS), y que tiene una longitud de 8 bits. Y el campo de etiqueta de flujo (*Flow Label*), que es un campo que fue implementado para tráfico que exigen transferencia en tiempo real y tiene una longitud de 20 bits.

Migración a IPv6

En el caso de las redes rurales se comienza desde cero para la implementación del protocolo IPv6 de forma nativa; inicialmente, se debe utilizar un *pool* de direcciones asignado por el Lacnic, y de esta forma integrarlo en los *router* usando interfaces a 1 Gbps. Desafortunadamente, al interior de las empresas se cuenta con direccionamiento IPv4, por tanto, es necesario tener en cuenta estrategias de migración del protocolo IPv4 a IPv6.

La migración al nuevo protocolo IP no puede ser efectuada en cortos periodos, pues requeriría la redefinición de un plan de direccionamiento IPv6 y de un trabajo en equipo que exige una coordinación muy minuciosa y un equipo técnico dedicado al 100 % a dicha actividad; además, la instalación del protocolo en cada *router* y *host* de la organización es de suma importancia, como la modificación de las aplicaciones para que puedan soportarlo.

Una de las razones que ha frenado la entrada triunfal de IPv6 es la traducción de direcciones de red (NAT), que alivia parcialmente el problema de la falta de direcciones. El inconveniente de NAT es que hace difícil o imposible el uso de algunas aplicaciones P2P, la voz sobre IP (VoIP) y los juegos multiusuario. También, NAT rompe con la idea originaria de internet, en la que todo el mundo puede conectarse; de esta forma, se desperdicia la capacidad de IPv6 para ofrecer nuevos servicios, como la movilidad, la calidad de servicio

(QoS), la privacidad, la seguridad, una mayor velocidad de procesamiento en los *routers* y otros aspectos técnicos.

Al respecto de lo anterior, el grupo de trabajo NGTrans (Next Generation Transition) definió tres mecanismos de transición que permiten la convivencia y la migración progresiva, tanto de las redes existentes como de los equipos de usuario.

Doble pila o pila dual de protocolos

La primera técnica es la de doble pila o pila dual de protocolos, un enfoque muy sencillo de implementar que requiere que los *hosts* y los *routers* soporten ambas versiones de IP y, por tanto, servicios y aplicaciones tanto de IPv4 como de IPv6. La pila dual de protocolos hace referencia a una solución de nivel IP con pila dual (RFC 2893) (IETF).

Este método de doble pila es un mecanismo fundamental para introducir IPv6 en las arquitecturas IPv4 actuales; se espera que siga siendo ampliamente utilizado en el futuro cercano. Un inconveniente de este método es que cada nodo retenga una dirección IPv4. Así, a medida que se difunde IPv6, la técnica de doble pila tendrá que ser aplicada donde ayude al proceso de transición.

Un servidor de doble pila puede soportar clientes solo IPv4 convencionales, nuevos clientes solo IPv6, y por supuesto, clientes de doble pila. Para aquellos casos en que haya insuficientes direcciones IPv4 se ha definido una combinación del modelo de conversión y de doble pila de protocolos, conocidos como DSTM (Dual Stack Transition Mechanism).

En resumen, el método de pila dual tiene una ventaja notable, ya que es fácil de desplegar y extensamente soportada. Su desventaja más sobresaliente es que la topología de red requiere dos tablas de encaminamiento y dos procesos de encaminamiento. Cada nodo en la red necesita tener actualizadas las dos pilas.

Tunneling (túneles configurados)

La segunda técnica se basa en túneles configurados o *tunneling*. Los túneles permiten conectarse a redes IPv6 “saltando” sobre redes IPv4, o en ciertos casos a la inversa, pueden ser configurados estática o dinámicamente como

“6to4” o “6over4”; para lo anterior, es importante tener en cuenta que, en los estadios finales de la transición, también se emplearán los túneles para interconectar las nubes IPv4 residuales a través de la infraestructura IPv6.

En este sentido, los paquetes IPv6 son encapsulados por un *router* de borde antes de ser transportados a través de la red IPv4; posteriormente, son desencapsulados en el extremo de la red IPv6 receptora.

Además, se han propuesto algunas herramientas, como TB (*tunnel broker*), para gestionar automáticamente el proceso de configuración de las peticiones de túneles de los usuarios. También existe ISATAP (*Intra-site Automatic Tunnel Addressing Protocol*), que es un nuevo borrador de internet, el cual describe otra técnica para evitar la configuración manual de túneles.

Hay muchas tecnologías de túneles disponibles. La principal diferencia está en el método que usan los nodos encapsuladores para determinar la dirección de la salida del túnel (López y Gelvez, 2010). Algunas de esas tecnologías son:

- Túneles manuales.
- Túneles automáticos.
- Túneles 6to4.
- Túneles 6over4.

Túneles manuales

Cada extremo es un nodo dual, en ellos se configuran las direcciones IPv4 e IPv6, tanto locales como remotas. Algunas de las ventajas que se destacan dentro de esta técnica son su disponibilidad en multitud de plataformas, como Cisco, Telebit, Linux, Solaris, etc. Además, esta es una técnica totalmente transparente respecto de IPv6 y superiores, por lo que no afecta las aplicaciones.

También, se presentan algunos inconvenientes, ya que esta no es una técnica dinámica, en el sentido de que se establece manualmente o de forma semiautomática, pues carece de sentido en el caso de que se requiera conectar miles de islas IPv6 distribuidas.

Túneles automáticos

Esta técnica permite a nodos duales comunicarse a través de una infraestructura IPv4, lo que define una interfaz virtual para la dirección “IPv4 compatible”. Los paquetes destinados a direcciones “IPv4 compatible” se envían por el túnel automático teniendo en cuenta las siguientes reglas:

- Dirección origen IPv6: dirección “IPv4 compatible” local.
- Dirección destino IPv4: extraída de la dirección “IPv4 compatible” remota.

Túneles 6over4

Esta técnica es como una LAN virtual que trabaja sobre subredes IPv4 con la unión de nodos IPv6 dispersos. El tráfico IPv6 entre nodos es encapsulado en IPv4. Una ventaja notable es que se trata de túneles establecidos dinámicamente y sin previa configuración, además, permite probar IPv6 en algunos nodos de una subred IPv4 sin necesidad de instalar el *stack* IPv6 en los *routers* internos.

No obstante, es un método adecuado únicamente para redes finales, por eso no está ampliamente implementado.

Traducción o conversión de protocolos

Esta técnica usa un mecanismo de traducción o conversión de protocolos, necesaria cuando un nodo “solo IPv4” intenta comunicar con un nodo “solo IPv6”. La cabecera IP ha de ser convertida, por lo que puede ser requerido un gran número de direcciones IPv4 para proporcionar un seudónimo al *host* IPv6 durante el enlace.

La traducción puede ser más compleja si la aplicación procesa las direcciones IP; de hecho, tal conversión hereda la mayoría de los problemas de IPv4 Network Address Translators. Los mecanismos de traducción más empleados son NAT-PT y Socks v5.

NAT-PT

Trabajar con esta técnica es fácil, ya que está implementada en la mayor parte de los *routers*, como Cisco, Nortel, Juniper, Vyatta y otros; además, muchas

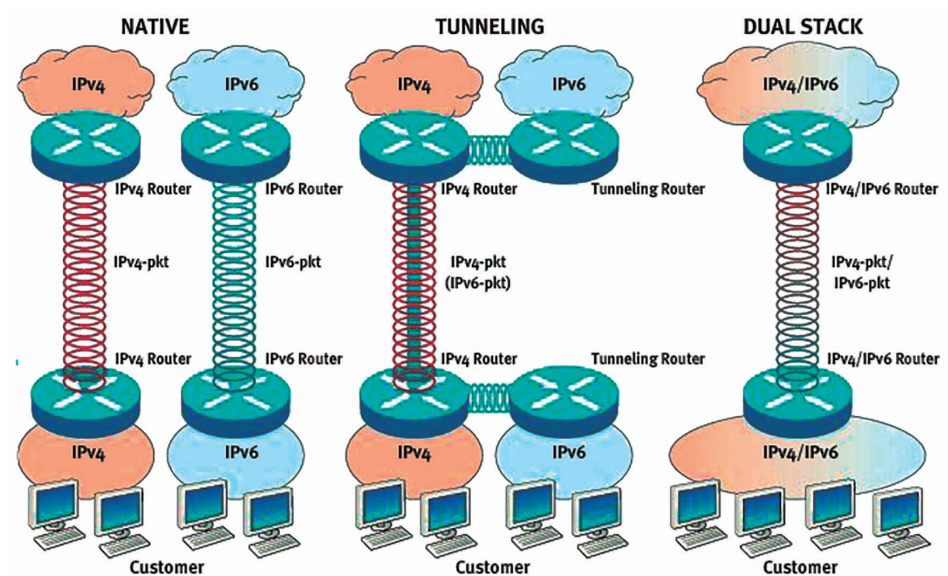
redes corporativas poseen experiencia en la administración de NAT. Es necesario tener en cuenta que el manejo de NAT implica un alto coste de gestión, administración y proceso de traducción; esto, si se compara con los recursos como *Tunneling*.

NAT-PT en realidad es NAT (se usa el mecanismo NAT para la asignación de la dirección IPv4) y el protocolo de traducción (para este protocolo se usa el mecanismo SIIT (*Stateless IP/ICMP Translation*) RFC 2766). Mientras se realiza la traducción IPv4/IPv6, se mantiene el estado durante la sesión.

Esta técnica no es transparente al nivel de aplicación, por lo que necesita algunas extensiones:

- DNS-ALG: transforma peticiones DNS “A” a peticiones “AAAA”.
- FTP-ALG: está al tanto de las conexiones que tienen lugar con FTP.

Figura 19. Mecanismos de transición a IPv6



Fuente: Salazar (2016).

Socks v5

Este método permite realizar la traducción de IPv4 a IPv6 y viceversa, conexiones siempre iniciadas por el cliente. Su uso elemental es permitir

conectividad IP directas a internet en redes con *firewall* a determinados *hosts*. Lo que inicialmente hace esta técnica es comenzar en el nodo cliente una conexión TCP o UDP con un nodo externo empleando el nombre completo FQDN (*Fully Qualified Domain Name*); enseguida, la librería Socksv5 en el cliente intercepta la resolución del nombre e inicia una conexión TCP al servidor Socksv5. Después, el servidor Socksv5 devuelve al cliente una dirección IPv4 remota falsa. Finalmente, el procedimiento anterior inicia la conexión TCP o UDP entre el servidor Socksv5 y el nodo remoto. Cabe apuntar que, si el nodo remoto es IPv6, se aplica el algoritmo de traducción SIIT.

Sin embargo, esta técnica implica que las librerías Socksv5 estén instaladas en todos los clientes que deseen tener acceso. Además, el proceso de traducción exige un consumo de recursos elevado, por lo que la carga de tráfico es una limitante a tener en cuenta. Como las técnicas de *tunneling*, la traducción o conversión se puede implementar en los *routers* y *hosts* de extremo. Por esta razón, para la conversión dentro de un *host* se han definido los mecanismos BIS (*Bump in the Stack*) y BIA (*Bump in the API*) (Deschamps, 2007).

Estrategias de migración

Aplicar técnicas de migración puede generar problemas de escalabilidad que podrían limitar enormemente el rendimiento de IPv6 en comparación con una solución inicial netamente nativa. Debido a esto, es fundamental tener bien controlada la migración, con el fin de evitar el despliegue de dos infraestructuras de internet paralelas.

La migración no solo afecta a IPv6. IP no es una tecnología aislada, pues implica muchas interacciones con las tecnologías actuales y emergentes. Por ejemplo, es fundamental definir cómo transportar el tráfico IPv6 sobre una arquitectura MPLS, que es la que proporcionan los ISP. Por lo anterior, existe el interés sobre un aspecto de gran importancia, como es la “continuidad del nivel de servicio”, o en inglés, LSA.

La migración de IPv4 a IPv6 no es solo una cuestión de direcciones o de *routing*. Cualquiera que sea la infraestructura habrá de proporcionar progresivamente los nuevos servicios IPv4, como IPQoS, seguridad IP.

En general, cuando se pretende aplicar una técnica de migración, se debe aplicar inicialmente a las redes finales, y según aumente el tráfico IPv6, a ISPs y Backbone principales.

Para clientes y servidores

Para las redes finales se debe seguir algunas indicaciones o recomendaciones. Es fundamental instalar servidores “Doble Stack”, que permitan recibir peticiones tanto IPv4 como IPv6; y también, clientes “Doble Stack” para la conectividad con servidores IPv4 e IPv6. Para esta aplicación en redes finales, hay que tener en cuenta qué técnica se utilizará.

Mediante mecanismos tipo túnel

Inicialmente, se debe tener la conexión IPv4 al ISP y entunelar el tráfico IPv6 en IPv4 hasta que el ISP ofrezca IPv6 totalmente. Posteriormente, se realiza la conexión IPv6 al ISP y se entunela el tráfico de IPv4 sobre IPv6.

- Migración mediante técnica tipo túnel.
- Mediante mecanismos de traducción.
- Se debe tener la conexión del ISP local implementado con IPv6 y se usa NAT-PT o SOCKSv5 como traductor.

Para ISPs

Implementar conexión a Backbone IPv4 e IPv6 o emplear túneles. Si se tiene un ISP tradicional, se establece el acceso a IPv4 y se ofrece acceso a IPv6 mediante traductor. En el caso de nuevos ISP, se tiene acceso directo a IPv6, y a través de internet mediante túneles; y para IPv4, mediante traductores.

Para Backbone

Para los Backbone se recomienda permanecer con la configuración que se tiene y hacer la conversión cuando el tráfico entunelado sea mayor que el tráfico IPv4. Además, se debe colaborar con otros Backbone o ISPs, debido a la cantidad de rutas que se pueden tener, y para no forzar la migración.

Aplicaciones de IPv6 en la industrialización rural

IPv6, como una herramienta fundamental para la industrialización rural, permite la conexión y comunicación de dispositivos y sensores en el IoT, lo que mejora la eficiencia, productividad y sostenibilidad en la agricultura y otros sectores en zonas rurales; estas aplicaciones se resumen a continuación (Tovar *et al.*, 2019).

- **Agricultura de precisión:** la incorporación de sensores y dispositivos IoT en la agricultura permite la recopilación de datos en tiempo real sobre condiciones climáticas, humedad del suelo, calidad del agua y otros parámetros. Con IPv6, se pueden asignar direcciones IP únicas a cada dispositivo, lo que facilita la comunicación y la gestión de datos para tomar decisiones más informadas en la producción agrícola (Aceros, 2020).
- **Ganadería conectada:** en la ganadería, la implementación de dispositivos conectados permite monitorear la salud y el comportamiento del ganado, el control de la temperatura en los establos, el seguimiento de la ubicación de los animales y la detección temprana de enfermedades. Con IPv6, todos estos dispositivos pueden ser identificados y accedidos de forma individual en la red, lo que facilita su gestión y control.
- **Gestión de recursos naturales:** la industrialización rural puede requerir una gestión más eficiente de los recursos naturales, como el agua y la energía. Con IPv6, los sensores conectados pueden proporcionar datos detallados sobre el uso de recursos, lo que permite optimizar el consumo y reducir el desperdicio.
- **Automatización de procesos:** en la industrialización rural, se pueden automatizar procesos agrícolas y de manufactura, lo que mejora la eficiencia y la productividad. IPv6 facilita la conectividad y comunicación entre máquinas y dispositivos, lo que es esencial para la automatización en tiempo real.
- **Mercados agrícolas conectados:** con IPv6, los agricultores en áreas rurales pueden acceder a plataformas y mercados en línea para vender sus productos directamente a los consumidores y otros compradores. Esto amplía su alcance y oportunidades comerciales.

- **Educación agrícola y capacitación:** la conectividad en zonas rurales a través de IPv6 permite el acceso a recursos educativos en línea y capacitación en agricultura y tecnologías relacionadas, con el fin de mejorar las habilidades de los agricultores y trabajadores rurales en temas tecnológicos (Aceros, 2020).

Seguridad de IPv6

La seguridad en IPv6 se basa en una serie de características y mecanismos diseñados para mejorar la protección de la comunicación y los dispositivos conectados a la red, en un entorno cada vez más conectado, donde la seguridad de los datos y la protección contra amenazas cibernéticas son aspectos críticos.

Esta es una de las características que deben ser usadas en agricultura inteligente para proteger cientos de millones de datos provenientes de los sensores IoT en los cultivos (Lamaazi *et al.*, 2014). Algunas de las características y ventajas de seguridad que ofrece el IPv6 liviano para redes inalámbricas son las siguientes:

- **Mayor espacio de direcciones:** IPv6 proporciona un espacio de direcciones mucho más grande que IPv4, lo que dificulta la predicción y el escaneo de direcciones IP por parte de atacantes. La cantidad de direcciones IPv6 es prácticamente inagotable, lo que mejora la privacidad y dificulta el rastreo de dispositivos.
- **Direcciones IP temporales:** IPv6 permite el uso de direcciones temporales o efímeras, lo que significa que los dispositivos pueden generar y utilizar direcciones IP diferentes en cada conexión. Esto contribuye a la protección de la privacidad y dificulta el seguimiento de los dispositivos a través de sus direcciones IP.
- **IPsec (IPv6 Security Extensions):** IPsec es una serie de extensiones de seguridad incorporadas en el protocolo IPv6. Proporciona cifrado, autenticación y protección de la integridad de los datos en la comunicación entre dispositivos, lo que garantiza la confidencialidad y seguridad de la información transmitida.
- **Protección contra ataques de red:** IPv6 incluye mejoras para protegerse ante ciertos tipos de ataques de red, como los ataques de inundación

de paquetes, mediante la implementación de mecanismos como *Neighbor Discovery Protocol* (NDP) y *Router Advertisement Guard* (RA Guard).

- **Mejor soporte para la gestión de tráfico:** IPv6 permite la configuración y priorización de paquetes de manera más eficiente a través de *Quality of Service* (QoS) y *Flow Label*, lo que mejora la gestión del tráfico en redes congestionadas y ayuda a protegerse contra ataques de denegación de servicio (DoS).
- **Simplificación de redes y enrutamiento:** IPv6 permite una mayor eficiencia en el enrutamiento y una simplificación de las tablas de enrutamiento, lo que facilita la implementación de políticas de seguridad y la detección de anomalías.
- **Autenticación y autorización de usuarios:** IPv6 proporciona mecanismos para autenticar y autorizar usuarios y dispositivos en la red, lo que mejora la seguridad y la protección contra accesos no autorizados.
- **Seguridad incorporada en dispositivos IoT:** IPv6 es esencial para la conectividad de dispositivos IoT, y al ofrecer características de seguridad sólidas, ayuda a proteger estos dispositivos frente a ataques y vulnerabilidades (Lamaazi *et al.*, 2014).

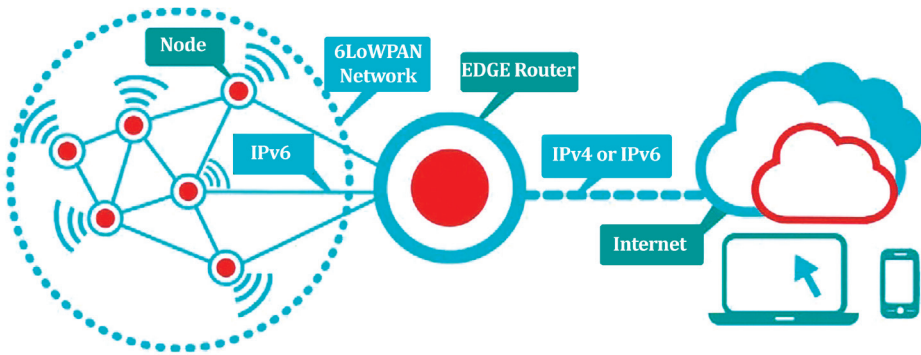
6LoWPAN

6LoWPAN es una abreviatura de *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks* (IPv6 sobre redes personales de área local inalámbricas de bajo consumo). Este es un estándar de comunicación que permite la conexión de dispositivos de baja potencia y con recursos limitados a través de redes IP. Fue desarrollado para habilitar la conectividad IPv6 en dispositivos con capacidades restringidas, como sensores y actuadores, que suelen operar con baterías y en entornos de redes inalámbricas de baja potencia.

6LoWPAN utiliza una compresión de encabezado IP para reducir la sobrecarga y la complejidad de los paquetes de datos IPv6, lo que la hace adecuada para aplicaciones en las que el ancho de banda y la eficiencia energética son fundamentales.

IoT se basa en tecnologías de conectividad como wifi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN y otras analizadas en los primeros capítulos; en el caso de 6LoWPAN, la conectividad IPv6 permite la comunicación entre dispositivos a través de internet, pero los mismos deben estar conectados todo el tiempo, mientras que los dispositivos inalámbricos en algún momento están “dormidos”; por este motivo, no están conectados todo el tiempo a internet.

Figura 20. Mecanismos de conexión de nodos WSN mediante 6LoWPAN a IPv6



Fuente: Harrison (2014).

Existen varios fabricantes y proveedores de *software* que ofrecen implementaciones y *stacks* de protocolos para implementar 6LoWPAN con licencias propietarias y de código abierto. Algunos de estos son:

- OpenWSN: es una implementación de código abierto de 6LoWPAN desarrollada por la comunidad de investigación OpenWSN. Está disponible bajo la licencia BSD y se enfoca en brindar una pila de protocolos completa y eficiente para aplicaciones de IoT en redes inalámbricas de baja potencia.

El estándar IEEE802.15.4e es la última generación de soluciones de redes confiables de energía ultrabaja para redes de baja energía y con pérdidas (LLN). La RFC5673 (requisitos de enrutamiento industrial en redes de baja potencia y con pérdidas) analiza las aplicaciones industriales y destaca las fuertes condiciones de operación, así como los estrictos requisitos de confiabilidad, disponibilidad y seguridad, para que un LLN opere en un entorno industrial.

- **Contiki:** es un sistema operativo de código abierto dirigido a dispositivos IoT y sistemas embebidos. Proporciona soporte para 6LoWPAN, junto con otros protocolos, como CoAP, MQTT y otros.

Capítulo 5. Drones para la agricultura 4.0

Uno de los retos más importantes de este siglo es la integración de las tecnologías emergentes con los procesos agropecuarios, sobre todo en la integración de tecnología con los pequeños productores; es por ello que, debido al rápido crecimiento de la tecnología de los drones, las aplicaciones han crecido. Estos instrumentos no solo se perciben para la detección, sino ahora se piensa en el dron como una herramienta más dentro de los procesos agropecuarios.

Este capítulo explora qué es un dron, cuáles son sus elementos y cuáles son sus usos en el sector agropecuario; el objetivo es discutir el cambio que esta tecnología tiene en la realidad de los territorios.

Drones

Inicialmente, para la observación terrestre se usaron satélites, los cuales, a través de su conjunto de sensores permitieron observar los procesos desde el espacio. Se analizaron los océanos y la tierra en diferentes lugares.

Un interés particular en esta observación fueron los procesos agropecuarios, por lo que estos análisis permitieron consolidar modelos para estudiar diferentes tipos de cultivos.

Las acciones de fumigación se vieron impactadas por aviones que dejaban caer tratamientos sobre los cultivos, pero con la aparición de los drones, que son vehículos aéreos no tripulados, surgieron nuevos retos y oportunidades.

Clasificación de los drones

Los drones pueden tener múltiples formas y configuraciones; sin embargo, existen dos configuraciones típicas usadas en la agricultura: drones de ala fija y drones tipo helicóptero. La mayoría se maneja por control remoto, pero se ha ido extendiendo el uso de la programación de planes de vuelo por puntos GPS para realizar un vuelo autónomo.

- Drones de ala fija: tienen la forma de un aeroplano, son ligeros y pueden planear, lo que optimiza el uso de la batería. Su despegue es diverso y se puede hacer desde una pista o una catapulta; sin embargo, generalmente es lanzado por una persona.
- Drones multirrotor o tipo helicóptero: estos drones tienen múltiples motores, pueden aterrizar o despegar de forma horizontal y no requieren una pista, pero si se realizan vuelos autónomos en ocasiones es necesaria una plataforma. Este tipo de dron es útil porque puede ejecutar diversas misiones; igual que el dron de ala fija, se usa para llevar cámaras, pero puede levantar mayor carga, lo que lo hace ideal para aplicaciones en agricultura.
- Dirigibles o globos: estos usan el aire para elevarse, sus aplicaciones suelen ser meteorológicas; pueden levantar cierto tipo de carga para cámaras y sensores. Tienen como inconveniente su recuperación.
- Otro tipo de drones experimentales son los de aleteo, los cuales, a partir del movimiento de los motores a una especie de aletas, permiten que el dron se mantenga en el aire; al respecto, intentan emular el movimiento de los animales, que los convierte en un sistema bioinspirado.

Una de las aplicaciones típicas de los drones es la telemetría, la cual permite detectar información a partir de cámaras. Esta función también es realizada con satélites, los cuales se mantienen en órbita. Cada uno de estos drones y satélites tienen sus ventajas y desventajas. Debido a la fusión sensorial y a la

relación de datos, las misiones usan diferentes dispositivos como elementos para captar información.

Los drones entregan informes de valores absolutos; al contrario, los satélites brindan valores relativos. El dron permite la generación de planes para el cultivo basados en tratamientos, lo que no puede hacer el satélite; asimismo, el dron se puede usar en cualquier tipo de cultivo y según el tipo de cámara se puede tener una mejor resolución de imágenes que garantiza mayor cantidad de datos. Al contrario, el satélite se usa para cubrir un mayor territorio, por lo que se enfoca en cultivos extensivos. También, el dron puede volar por debajo de las nubes, pero el satélite depende de las condiciones meteorológicas para tomar los datos.

El tratamiento de información en el territorio se obtiene de diversas formas; a mayor altura, tenemos satélites, a más baja altura drones. Sobre tierra se ubican estaciones de monitoreo; y del suelo, se obtienen datos para correlacionarlos y conocer mejor su comportamiento.

Elementos de un dron

- **Controladora de vuelo:** esta es la computadora de abordo, tiene la función de procesar la información; en algunos casos procesa datos de sensores y actuadores, así como mantiene la misión y procesa imágenes.
- **Acelerómetro:** un acelerómetro es un sensor capaz de captar y medir la aceleración lineal y angular; esto le permite determinar el ángulo de vuelo y la aceleración dinámica. Hay tres tipos de acelerómetros, el primero, es uno capacitivo MEMMS; el segundo, es piezoeléctrico; y el último, es piezoresistivo.
- **Giroscopio:** mide la fuerza rotacional del dron mientras vuela; se usa para revisar los giros y calcular la altura.
- **Barómetro:** es un sensor utilizado para obtener la altitud del dron mediante la medición de la presión atmosférica; se usa para que el dron pueda mantener la altitud respecto del suelo.
- **Brújula o magnetómetro:** mide la fuerza magnética, por lo que es capaz de detectar el norte magnético; en el dron permite que el frente pueda girar o que avance.

- **Receptor GPS:** el sistema de posicionamiento global permite obtener la posición geográfica en términos absolutos, lo que facilita el vuelo autónomo del dron sobre rutas definidas.
- **Fuselaje:** es la estructura del dron que permite ubicar los componentes, así como los aditamentos, que pueden ser sensores, motores, cámaras, entre muchos; la estructura debe tener cierto peso para que el dron pueda volar.
- **Motores:** son los encargados de hacer girar las hélices del dron para que pueda volar; de acuerdo con el dron, se establece el número de motores.
- **Transmisor y receptor de radio:** también conocido como el radio de control que incorpora un transceptor. Aunque en el dron existe otro transceptor, que es capaz de recibir y transmitir información, generalmente las señales son para el control del movimiento del dron.
- **Baterías:** son la fuente de energía del dron; es uno de los elementos de riesgo de misión más importantes. De acuerdo con la carga de la batería se establece el tiempo de la misión; en el diseño de un dron la selección de los componentes que consumen energía debe ser proyectada para el tipo de batería.
- **Enlace de telemetría:** este es el que recibe la información de vuelo, así como los datos de los sensores correspondientes a la velocidad, altura, distancia y orientación; también, puede llevar las imágenes de una cámara instalada en el dron para controlar su movimiento.

Drones para agricultura de precisión

El concepto de agricultura de precisión varía de acuerdo con el enfoque planteado; en un concepto general, una acción particular y en un lugar específico de un cultivo, la acción llevada a cabo por el dron puede ser la de la aplicación de un fertilizante o el control de goteo de agua en un riego.

Debido a la capacidad de un dron de llevar sensores, las opciones dentro de la agricultura de precisión aumentan; esto ayuda a consolidar grupos de información georreferenciada. El análisis de esta información permite conocer el cultivo y el terreno por medio del análisis de datos para, en

cierta medida, tomar decisiones informadas y lograr construir predictores e índices.

Teniendo en cuenta las múltiples fuentes de información que se pueden tener en un cultivo y la capacidad de compilar datos a diferentes resoluciones, como un sensor de color en una hoja y una imagen de un dron o un satélite, la resolución de datos aumenta en distintas secciones de un cultivo, lo que permite conocer con mayor detalle el territorio.

Teledetección

Inicialmente, la teledetección fue asociada con la adquisición de datos de la superficie terrestre por sensores en plataformas espaciales, como satélites (Instituto Geográfico Nacional, 2022); existen diferentes constelaciones de satélites para la observación de la tierra, uno de ellos se dirige a la constelación Copernicus, con los satélites Sentinel, los cuales proporcionan servicios globales de vigilancia terrestre y oceanográfica.

También, están los GOES (Arias, 2021), que pertenecen al programa estadounidense del National Weather Service (NWS), adscrito a la NOAA, los cuales permiten, entre muchas cosas, observar la cobertura de nubes del planeta; los *Landsat* se emplean para la observación de la superficie terrestre, con una resolución de 30 metros en las bandas del 1 al 5 y de 120 metros en la banda 6, que corresponde a la térmica.

De la misma manera, se distingue el MODIS, que es un instrumento científico lanzado por la NASA. Cuenta con 36 bandas espectrales en longitudes de onda entre 0,4 μm y 14,4 μm . Su resolución espacial es de 250 m en las bandas 1 y 2; 500 m en las bandas 3 a 7; y 1 km en las bandas 8 a 36. Se usa principalmente para entregar medidas en gran escala de la dinámica global, cambio de cobertura de nubes, procesos del océano, atmósfera baja, entre otras.

Dentro de la agricultura de precisión se contempla el uso de todas las fuentes digitales de información, por lo que el dron se convirtió en otra fuente debido a su capacidad de carga, la cual puede transportar tanto distintos instrumentos de teledetección, como diferentes tipos de cámaras infrarrojas, multiespectrales, en blanco y negro, color y falso color.

Las imágenes pueden ser de mapa base para el contexto, imágenes verticales para creación y actualización de mapas, imágenes oblicuas para conocimiento de la situación, imágenes estéreo para cartografía precisa en 3D, imágenes en movimiento para conocimiento de la situación y, por último, imágenes de referencia.

Una vez tomada la imagen, esta es procesada y se miden diferentes tipos de parámetros. Junto a modelos de análisis matemáticos e inteligencia artificial se pueden obtener datos de índices de vegetación, como NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), la cual estima la salud de las plantas con base en la luz del infrarrojo cercano (NIR) reflejada; o ReCI (índice de clorofila de borde rojo), que detecta la clorofila y, por tanto, la capacidad de fotosíntesis.

Mientras tanto, NDRE (diferencia normalizada del borde rojo) también detecta la clorofila, pero es útil en las etapas media y tardía. MSAVI (índice de vegetación ajustado al suelo modificado), por su parte, controla las primeras etapas del desarrollo de las plantas para supervisar las condiciones de los cultivos; y NDMI (índice de humedad de diferencia normalizada) describe el nivel de estrés hídrico del cultivo (Kogut, 2020).

Entre otros usos de la teledetección con drones, se tiene la medición del estrés hídrico y evapotranspiración, la detección de patologías o daños por plagas (Torres *et al.*, 2023), los índices de maduración y las predicciones de cosecha.

Detección del estado hídrico de las plantas

Esta se realiza por medio de la obtención de imágenes de reflectancia y temperatura de la superficie (Berni, 2009). La información es valorada por medio de parámetros biofísicos con índices de vegetación de banda estrecha para cuantificar el estado hídrico de la vegetación; lo anterior, permite la gestión eficiente del riego en los cultivos.

Tratamientos localizados

Uno de los usos extendidos es la aplicación de tratamientos a plantas dentro de un cultivo, por lo cual los drones tienen la capacidad de levantar un alto peso para el depósito, en el que se pueden almacenar fertilizantes,

plaguicidas y herbicidas. El dron puede ser operado por un piloto o ejecutar rutas específicas.

Dependiendo del tipo de dron y de la tecnología que se use, este puede llevar tratamientos a plantas en particular o a una parte en especial de la planta, ahora, dependiendo del cultivo y del tipo de distribución de plantación, se establece la movilidad del dron, que le permite entregar el tratamiento en la copa o moverse alrededor de la planta.

Supervisión de áreas fumigadas

El uso de drones para supervisión puede realizarse por medio del análisis de imágenes o a través de la recolección de muestras del suelo, que también puede efectuar el dron. El proceso consiste en enviar estos instrumentos para obtener muestras, el dron puede recorrer más rápido el terreno y hacer sobrevuelos varias veces, así como acceder a espacios difíciles.

Inventarios

Uno de los elementos de mayor uso es el levantamiento de inventarios agrícolas y forestales; las imágenes obtenidas por el dron son procesadas mediante algoritmos de inteligencia artificial y computación visual que pueden levantar inventarios por planta, por lote y por terraza; asimismo, se pueden identificar las áreas efectivas y las densidades.

Pero no solo se realizan inventarios agrícolas, también en la parte pecuaria su uso es relevante, por ejemplo, el conteo de cabezas de ganado para garantizar su seguridad.

Siembra aérea

La siembra aérea permite recopilar información del terreno para planificar el cultivo. El contraste de los datos con información directa del terreno hace posible determinar si se deben hacer preparaciones de suelo; algo que suele ocurrir es que el cien por ciento del área cultivable no se aprovecha, lo que disminuye la eficiencia del proceso.

Asimismo, el uso de drones también se considera para esparcir semillas en el cultivo. Esto tiene consideraciones positivas y negativas. Si el terreno

está preparado, el dron puede moverse a lugares específicos para depositar las semillas; sin embargo, existen riesgos, el primero es que al esparcir las tal vez no caigan en lugares adecuados y que estas no germinen, de la misma manera, existe la posibilidad de que los pájaros las consuman.

Otra opción es usar los drones para disparar bombas de semillas; estos instrumentos son capsulas que tienen semillas rodeadas por un sustrato que facilita su germinación, adicionalmente, a su alrededor tienen una coraza que las protege de los pájaros y otros animales.

Seguridad

Además del uso específico para las plantaciones, los drones brindan la posibilidad de manejar aspectos de seguridad relacionados con los inventarios, el movimiento, el conteo de ganado y la protección de perímetros a través de la detección de intrusos. También, advierte la afectación del terreno por algún desastre natural.

Una de las dificultades de las labores de los trabajadores corresponde a la seguridad en el trabajo, que en el sector agropecuario no son fáciles de controlar debido al desconocimiento y las condiciones de los espacios laborales, que se ven afectadas por temas ambientales. El uso de drones permite conocer la zona para detectar riesgos que puedan poner en peligro la vida de las personas.

Adicionalmente, su empleo para las actividades en el sector agropecuario permite mitigar los efectos del cambio climático y facilita la reducción de la contaminación causada por el bajo o nulo consumo de combustible; esto permite reducir las emisiones de carbono, atenuar el consumo de agua, optimizar los sistemas de riego y mejorar la tasa de utilización de los plaguicidas.

Aspectos legales para el uso de drones en Colombia

En Colombia, la Aeronáutica Civil o la Aerocivil es la autoridad del espacio aéreo; se encarga de regular el uso de drones, que está limitado al vuelo recreativo y comercial. En términos legales, se aplican los siguientes documentos (Álvarez, 2023):

- Decreto 1079 de 2015: establece condiciones y requisitos para la operación de aeronaves no tripuladas en el espacio aéreo colombiano. Asimismo, instaure requisitos para la obtención de un permiso de operación, define la clasificación de los drones y las restricciones para su uso.
- Resolución 1335 de 2018: indica los requisitos para la obtención o renovación de una licencia de piloto de drones en Colombia.
- Resolución 0706 de 2015: establece las zonas restringidas para el vuelo de drones en Colombia. La resolución determina los espacios en los que no se permite su operación, como aeropuertos, bases militares y otras áreas de seguridad nacional.
- Circular Aeronáutica CO AVSEC 06/2018: establece las medidas de seguridad aeroportuaria para la operación de drones en Colombia. La circular define las medidas de seguridad que deben seguir los operadores de drones al volar cerca de aeropuertos y otras instalaciones aeroportuarias.

Ahora, según la reglamentación no se pueden realizar procesos de fumigación con drones en Colombia, a estos solo se les permite trabajar con temas de imágenes.

Del uso de drones para el conocimiento del territorio a drones agropecuarios

El uso tradicional de los drones está mudando al uso industrial en sistemas agropecuarios debido a su versatilidad, además, de su cualidad para transportar sensores y cámaras. Hoy estos sistemas son capaces de mover cargas de un peso moderado, y se le suman ventajas como la conectividad a internet, el IoT y la inteligencia artificial, que hacen que su uso se incremente.

El futuro inmediato del dron es la aplicación de tratamientos de precisión, que dependen de la planta y las condiciones, esto, por la toma de decisiones sin intervención humana. Por lo anterior, la extensión de la inteligencia artificial va a permitir la implementación de decisiones en tiempo real. Mediados por el dron, la inteligencia artificial podrá tomar decisiones sobre el tipo de tratamiento, la cantidad y el momento en que se debe realizar una actividad, así como el nivel de precisión (Croptracker, 2023).

También, el dron servirá para el transporte de material dentro de la finca, por lo cual, dentro del proceso logístico será un instrumento más. Este podrá ser un elemento que ampliará las redes de comunicaciones, lo que significa un aumento de redes de comunicaciones temporales en un cultivo. El uso de los drones amplía el espectro de aplicaciones, lo que se traduce en la construcción de un cultivo inteligente.

Barreras de adopción

Este tipo de tecnología, que se despliega en el territorio, crea una nueva generación de agricultores (Abderahman *et al.*, 2022) expertos en el uso de tecnología. Esto trae consigo un conjunto de retos, uno de ellos es la seguridad de los datos, lo cual lleva a la exploración del aseguramiento de la información y del uso de *block-chain* para las redes de IoT. Otro de los desafíos, es la interoperabilidad e integración con las TIC, lo que finalmente permitirá disminuir los costos para su implementación.

Otro reto es generar la apropiación de conocimiento por parte de los pequeños agricultores con el fin de que este tipo de tecnología sea usada no solo por los grandes propietarios. Se espera que su uso se masifique y genere un impacto duradero que transforme la realidad del país y le permita proyectarse como una potencia en agricultura y tecnología.

Capítulo 6. Evaluación de conectividad a internet a nivel rural: caso de estudio aplicado en tres municipios para evaluar la conexión a la agricultura inteligente

Desde el momento en que un operador de telefonía móvil o proveedor inalámbrico comienza a prestar sus servicios en una determinada zona rural es necesario hacer un estudio completo con el fin de determinar distintos parámetros que permitan realizar un análisis detallado en cuanto a la calidad de la red ofrecida. Para ello, se elaboran mediciones a partir del uso de *software* especializados (como *QualityPoc* y *Wikiloc*) dentro del margen para cobertura de la red telefónica actual en zonas donde no se cuenta con fibra óptica.

Para obtener una pequeña muestra de este tipo de cobertura como única fuente de acceso a internet, se hizo un estudio en localidades de Cundinamarca como Gazajujo y La Esmeralda, así como en el departamento de Huila. Esto permite alcanzar las variables de potencia de recepción de la señal de referencia (RSRP) y la calidad recibida de la señal de referencia (RSRQ), con las cuales se logra dar una amplia descripción a nivel de cobertura y calidad del servicio.

Lo anterior, con los objetivos de observar si se cumple o no con la norma establecida por el Ministerio de Tecnologías de la Información y la

Comunicación, dar apertura al planteamiento de diversas estrategias con el fin de mejorar la red ofrecida, y finalmente, lograr una adecuada conectividad a internet y acceso a IoT para el futuro *Smart Agro* en Colombia.

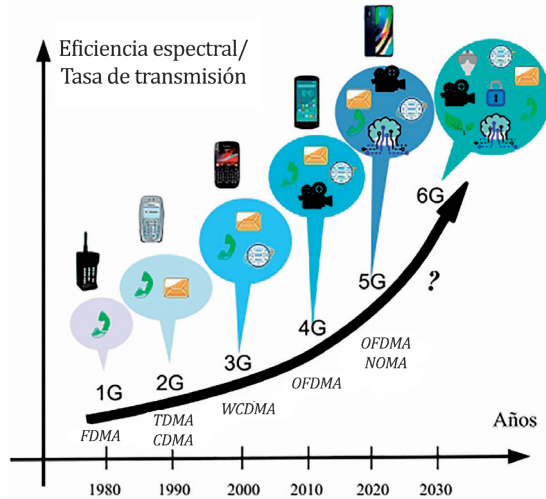
El mundo de las telecomunicaciones se hace cada día más amplio; esto, a partir del desarrollo de las diferentes generaciones que se han ido creando a lo largo de la historia (2G, 3G, 4G, 5G); dicha evolución ha dado apertura a la aplicación significativa de la tecnología en el día a día del ser humano, lo que incide de manera considerable en la mayoría de las actividades diarias que se realizan y en aspectos como la educación, la comunicación, la economía, entre otros.

Teniendo en cuenta la importancia de la tecnología en la vida de las personas y en su desarrollo socioeconómico, se hace de vital importancia la disponibilidad de las redes para la población. Actualmente, el mundo está en camino a la 5G. Esta nueva generación promete servicios que mejorarán las experiencias de uso a través del acceso a video de ultra alta definición, video en 360°, servicios en la nube y comunicaciones inmersivas basadas en la realidad aumentada y la realidad virtual.

A diferencia de las redes 4G, las redes 5G ofrecen soporte nativo para aplicaciones orientadas a las comunicaciones entre computadores. Esto es fundamental para el desarrollo de la industria 4.0, el transporte inteligente, la *e-health*, la agricultura inteligente, y en general, para todo lo relacionado con la conectividad en las ciudades inteligentes y en la zona rural.

Dicho lo anterior, el 5G se construye de acuerdo con las normas emitidas desde el 2017 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunications Union, ITU) (Gutiérrez, 2020).

Colombia se encuentra en un proceso de constante adaptabilidad tecnológica; se espera que en poco tiempo se logre dar cobertura a la mayoría del territorio, al igual que se continúe avanzando en la actualización de las redes ya disponibles. Por tal razón, es necesario gestionar y contribuir en dicho proceso mediante la cualificación de la red LTE en determinadas zonas del territorio colombiano.

Figura 21. Evolución de la telefonía celular en países avanzados

Fuente: Gutiérrez (2020).

La red LTE brinda una amplia gama de posibilidades a la hora de utilizarse; cuenta con determinados estándares específicos, dados a partir de mediciones de parámetros como la potencia de recepción de la señal de referencia (RSRP) y la calidad recibida de la señal de referencia (RSRQ), que permiten confirmar si realmente la cobertura ofrecida por los operadores cumple con una calidad adecuada.

Para dichos parámetros, en la Resolución 3078 de 2019, se estipula el nivel de calidad mínimo que se debe ofrecer por parte de los operadores, de modo que estos serán utilizados como referencia para el posterior análisis de los resultados obtenidos.

Cabe anotar que las redes 4G seguirán en expansión y continuarán en operación durante varios años, como soporte a servicios de comunicaciones orientados a personas. Según la última versión de *Ericsson Mobility Report*, se espera que para el 2026 haya una coexistencia de diversas tecnologías para atender a los usuarios móviles, entre ellas, 5G, LTE, WCDMA/HSPA y GSM/EDGE. Sin embargo, la coyuntura actual también demanda servicios orientados a la comunicación entre máquinas, con el fin de soportar aplicaciones de la industria 4.0, sistemas de transporte inteligente y automatización del hogar.

Tales aplicaciones plantean retos nuevos, como garantizar el servicio en zonas de cobertura con una gran densidad de dispositivos interconectados; transmisión con baja latencia para aplicaciones sensibles al retardo; soporte de enlaces de banda ancha en condiciones de alta movilidad similares a las que se encuentran en trenes de alta velocidad; y la reconfigurabilidad de la red para un manejo flexible y eficiente de sus recursos. Las redes 5G buscan solventar estos retos.

Al respecto, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) definió tres casos de uso para estas nuevas redes:

1. Banda ancha móvil mejorada (*Enhanced Mobile Broad Band*, EMBB): aplicaciones centradas en el usuario final caracterizadas por requerir acceso a contenido multimedia, y, por tanto, altas transferencias de datos con velocidades pico de hasta 20 Gbps y velocidades percibidas por el usuario de hasta 100 Mbps, además de dar soporte de movilidad de hasta 500 km/h y una eficiencia espectral tres veces superior a la proporcionada por 4G. Algunos ejemplos de aplicaciones EMBB son la voz y el video móvil de ultra alta definición, así como la realidad virtual y la realidad aumentada para experiencias de comunicación inmersivas.
2. Comunicaciones masivas de tipo máquina (*Massive Machine-Type Communications*, MMTTC): aplicaciones que involucran gran cantidad de dispositivos conectados, los cuales transmiten un volumen bajo de datos con poca sensibilidad al retraso y cuyo consumo de energía es típicamente bajo. Aplicaciones de este tipo incluyen vehículos conectados, cuidado de mascotas y personas, y redes de sensores y actuadores inalámbricos. El objetivo para este caso de uso es tener una capacidad de tráfico de 10 Mbps/m², una densidad de conexión de varios dispositivos/km², y una eficiencia energética de la red 100 veces superior a la de 4G.
3. Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (*Ultra Reliable Low Latency Communications*, URLLC): aplicaciones caracterizadas por operar en tiempo real, como las relacionadas con la seguridad del transporte, cirugías remotas y la automatización de procesos industriales, las cuales requieren latencias bajas de hasta 1 ms.

La Figura 16 resume los principales requisitos de rendimiento de estos tres casos de uso, además, los compara con sus contrapartes de 4G.

Figura 22. Indicadores de rendimiento de las redes 4G y 5G

Indicador	4G	5G
Tasa pico de transmisión UL	500 Mbps	10 Gbps
Tasa pico de transmisión DL	1 Gbps	20 Gps
Eficiencia espectral pico UL	6.75 b/s/Hz	15 b/s/Hz
Eficiencia espectral pico DL	15 b/s/Hz	30 b/s/Hz
Densidad de conectividad	10 ⁵ disp./km ²	10 ⁶ disp./km ²
Movilidad	350 km/h	500 km/h
Capacidad de tráfico por área	0.1 M b/s/m ²	10 M b/s/m ²
Latencia	20 ms	1 ms

Fuente Gutiérrez (2020).

Escenarios de comportamiento real de telefónica rural

Drive test

A la hora de establecer un escenario lo más cercano posible al de un usuario de la red, el *drive test* presenta lo necesario, pues da la posibilidad de recrear distintas situaciones a las que el usuario se enfrenta en su rutina diaria, ya sean cambios abruptos como el constante movimiento o el cambio geográfico. En resumidas cuentas, el *drive test* consiste en la constante medición de distintos parámetros con el uso de un vehículo motorizado en tiempo real, en este caso, de la cobertura móvil alrededor de las estaciones base en cada sector seleccionado.

Para este caso, se plantean dos posibles escenarios generales, uno estático y otro dinámico; cada uno también se divide en dos casos específicos, el modo conectado (datos conectados) y el modo idle (datos apagados). Para cada una de las posibilidades planteadas se realizará una serie de pruebas con el uso de un teléfono celular y del *software* QualiPoc y G-NetTrack Pro.

Estático

Dentro del *drive test* se hace referencia a un acercamiento directo hacia todo posible escenario que una determinada zona pueda presentar; por tanto, se debe realizar una selección de diferentes puntos, donde cada uno sea adecuadamente caracterizado con el fin de identificar los distintos factores a analizar.

En cuanto al procedimiento, se espera obtener mediciones que permitan observar a detalle los niveles de calidad y cobertura de la red en la zona; para ello, se realizan pruebas como:

- Llamada modo idle.
- Llamadas VoLTE.
- Pruebas *speedtest*.
- Navegación web.

Dinámico

El sistema de cobertura para una determinada zona debe estar adaptado tanto a los diferentes factores geográficos como a la densidad poblacional de cada sector; por esta razón, se hace referencia al concepto de celda, con el que se espera obtener un buen nivel de cobertura al igual que un servicio que obedezca a una buena calidad (QoS).

Para el *drive test* se selecciona un radio a recorrer basándose en la ubicación de la antena encargada, la cual se recorre en su totalidad mientras se realizan mediciones específicas, que tienden a tener una duración considerable. Así, se identifica el comportamiento de la red en los distintos espacios a los que se enfrenta. Dentro de estas pruebas se hallan:

- *Drive-Walk test*.
- Descarga de elementos (1gb).

Software

Asumiendo la importancia que llega a tener cualquiera de los tantos factores que pueden afectar las mediciones, en el *drive test* se opta por adaptar un *software* para cada uno de estos, de modo que sean adecuadamente tratados

y se vean inmersos dentro del procedimiento. De esta manera, se asigna un *software* para la medición de cobertura (QualiPoc) y el reconocimiento geográfico e identificación exacta de las rutas a realizar (Wikiloc).

QualiPoc

La tecnología móvil ha marcado un antes y un después en cuanto a cómo se manejan las distintas situaciones que se presentan en el diario vivir, por tanto, es de crucial importancia el contexto y la forma en la que se desee evaluar la cobertura y la calidad de una red, para que se realice de una manera acorde con las necesidades del usuario.

QualiPoc es una herramienta adaptada a dichas condiciones. Cuenta con una amplia gama de posibilidades a la hora de testear una red; en primer lugar, están las llamadas de voz, para ello, se asignan las herramientas para cualificación de sonido en un rango sumamente amplio, esto, adaptado a partir de los algoritmos P.863(POLQA) y SQuad, los cuales se enfocan en permitir un testeo sencillo de realizar y con resultados de alta precisión.

De igual manera, se encuentra el contenido multimedia (VMOS) y el video *streaming*, para lo cual se destina un algoritmo especializado en servicios multimedia IP, dentro del cual se encuentran las principales aplicaciones consumidas por el usuario, como YouTube o Facebook. Esto permite observar a detalle el comportamiento de la red y generar posibles métodos de optimización.

Haciendo referencia al *drivetest*, Qualipoc cuenta con una herramienta que se adapta bastante bien al proceso que este exige, en este caso, al componente dinámico. Para ello, se asigna la herramienta de monitoreo de mapa, la cual permite observar a detalle el comportamiento de la red dentro de una ruta determinada, lo que hace posible conocer si el comportamiento se mantiene o no durante un determinado recorrido, y marca de manera clara en qué secciones del camino existe una cobertura mejor o peor según sea el caso. En este proceso se da apertura a una identificación más sencilla de las diferentes posibles causas que puedan existir dentro de un territorio.

En cuanto a las tecnologías LTE, en las que la complejidad de la medición es considerable y se plantean parámetros específicos para determinar su correcto funcionamiento, Qualipoc se adapta perfectamente. Esta herramienta

es capaz de obtener y mostrar de forma adecuada los elementos enlistados a continuación:

- VoLTE.
- Celdas de servicio locales y vecinas (parámetros: Q_{RxlevMin}, P_{max}, MaxTxPower, S_{RxLev}).
- Número de antenas de transmisión.
- Ancho de banda.
- Phy Cell Id y EARFCN.
- RSSI, RSRP y RSRQ.
- EMM PLMN ID, EMM.

Toda la información obtenida es organizada y mostrada en diferentes paneles según su categoría; esto se podrá observar a detalle en los resultados del *drive test*. Cabe resaltar que este *software* también es capaz de soportar muchas más tecnologías de red, dentro de ellas las 5G; sin embargo, para este caso de aplicación (banda LTE) no se hará énfasis en lo mencionado.

G-NetTrack Pro

Normalmente, para realizar mediciones de alta precisión se suelen necesitar equipos especializados, los cuales implican altos costos y limitan considerablemente la movilidad para la medición; estos aspectos van bastante en contra de lo que se espera hacer en el *drive test*. En consecuencia, se implementa G-NetTrack Pro, esta herramienta nos ofrece una visión muy completa de los parámetros existentes dentro de la red móvil, y en este caso, la red LTE. Este es un *software* adaptado para equipos móviles, que permite obtener una perspectiva adecuada, tanto para el usuario como para el administrador de la red.

Una especialidad bastante marcada de este *software* es el estudio a profundidad de las celdas dentro de la red, que serán caracterizadas a detalle a partir de aspectos como las distancias que existen entre cada una, las líneas de servicio que puedan prestar y su calidad, el rango que posee cada una, el acceso a una amplia base de datos que permite comparar las distintas celdas de acuerdo con la red que se trabaje y sus tecnologías, una clasificación por

colores bien definida entre los niveles de calidad que se vayan presentando dentro del test, entre otras funciones.

Un segundo aspecto, bastante completo que posee esta aplicación, es su sistema de mapeo y cartografía de alta precisión, el cual permite establecer la afectación al relieve de la zona a testear, los fenómenos como la zona de Fresnel, las distancias entre el transmisor y el receptor, al igual que las distancias que existan entre la línea directa y los distintos obstáculos posibles, como construcciones o vegetación, incluso la curvatura de la Tierra. Todos estos aspectos, importantes dentro de una correcta medición de cobertura y calidad de señal, son tenidos en cuenta.

Estas herramientas se aplican a los distintos casos en los que se ofrece la tecnología, dentro de ellos las llamadas de voz, el servicio multimedia, la mensajería instantánea (SMS), el *ping* máximo y mínimo que presenta la red, las velocidades de subida y bajada de archivos en tiempo real, entre otras posibles funciones.

Xirio

Dentro de las distintas pruebas a realizar para cualificar la cobertura de una red, uno de los principales obstáculos es la capacidad de abarcar todo el territorio a tratar; Xirio se presenta como una herramienta muy potente, pues cuenta con una base de datos sumamente amplia; dentro de ellas, se destacan sus altos niveles de detalle en aspectos como la cartografía, las tecnologías de transmisión admitidas y su amplio margen de estudio a nivel territorial.

Esta herramienta está adaptada a prácticamente todas las tecnologías que, hasta la fecha, existen en telecomunicaciones. En este caso, LTE cuenta con diferentes niveles de estudio para un área de cobertura en su totalidad, entre los que se encuentran los distintos cálculos y análisis a nivel de potencia y calidad que se puedan presentar; para ello, se tienen en cuenta todos los factores que ocurren en la zona determinada y se ilustran resultados muy completos y detallados.

A nivel de espectro radioeléctrico, esta herramienta tiene la posibilidad de exportar archivos a la plataforma Sirenet, por medio de la cual es posible realizar un análisis muy profundo, en el que es posible llegar a distintas posibilidades de optimización para la red.

Finalmente, entre los parámetros para LTE que se permiten medir en un área amplia se encuentran:

- Rango de señal RSRP.
- Rango de señal RSRP LTE IoT.
- Rango de solapamiento.
- Rango de interferencia.
- Rango de SSI.
- Rango de RSRQ.
- Rango de RS SINR.
- Rango de PUSCH SINR.

Cabe resaltar que este es solo un breve resumen de las capacidades para este *software*, en el que se muestran los aspectos generales para la red LTE; sin embargo, este instrumento tiene funciones que es de suma importancia explorar en otros ámbitos.

Wikiloc

La cobertura y la calidad del servicio de red se puede ver afectada por distintos factores a nivel geográfico y climático, esto, debido principalmente al comportamiento que manejan las señales inalámbricas, como el ruido, la atenuación, la distorsión, las interferencias, entre otros. De modo que, con el fin de reconocer e identificar en detalle todos estos aspectos de manera específica, Wikiloc es capaz de mostrar una perspectiva completa de las diferentes rutas a realizar, en las que se especifica en detalle el recorrido y sus características geográficas, y se permite una amplia documentación y manejo.

Espectro de banda celular (LTE)

La cuarta generación de las comunicaciones apareció en el 2009, como parte de la evaluación constante de las comunicaciones a partir de diferentes niveles de velocidad considerablemente más altos que sus predecesoras. Con la llegada de la 4G, apareció el video *streaming*, los videojuegos en línea y otras aplicaciones. Su implementación no ha sido del todo rápida, dado que la expectativa terminó siendo más alta de lo esperado; al mismo tiempo, se

implementó LTE como la evolución a largo plazo, así como la tecnología de banda ancha que sirve para la transmisión de datos y dar acceso a internet a los dispositivos móviles. LTE es la tecnología que permite una transición gradual entre la 3G y la 4G.

La tecnología de red LTE está asignada por recomendación de la UIT y por el Ministerio de las TIC en el caso de Colombia a las bandas de 700 Mhz, 1900 Mhz y 2500 Mhz; para este caso, la investigación se enfocará en la primera. Al ser la de menor frecuencia, presenta características que se pueden aprovechar ampliamente a la hora de prestar servicios móviles; esta banda ofrece una cobertura mayor por estación comparada con las demás bandas nombradas anteriormente, así como un uso más eficiente del espectro respecto de las tecnologías de segunda y tercera generación.

De igual manera, conforme con lo establecido en la Resolución 181 de 2019, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) ha atribuido la banda de frecuencias 698 a 806 MHz al servicio móvil terrestre a título primario que, en consideración con las ventajas de cobertura, se identifica como una gran herramienta para proporcionar servicios de banda ancha inalámbrica a zonas rurales con baja densidad de población a un costo eficiente; por ello, se asigna un alto nivel de prioridad a la expansión de estas tecnologías en todo el país.

En términos de cobertura, y por ley (Resolución 3078 de 2019), el servicio de red LTE debe mantener un nivel de RSRP de al menos -100 dBm para el nivel de potencia recibida de señal de referencia (RSRP) desde un punto comprendido dentro de la localidad hasta mínimo dos kilómetros a la redonda. En cuanto a velocidades, se estipula en el caso de bloques 2x10 MHz (20 MHz) un nivel de velocidad pico de bajada (*downlink peak*) de 73,7 Mbps y un nivel de velocidad pico de subida (*uplink peak*) de 36,7 Mbps.

Localidades

Gazajujo, Ubalá (Cundinamarca)

Actualmente, el municipio de Ubalá se encuentra seccionado en dos sectores, separados por el municipio de Gachalá. Como límites geográficos, se establece para el sector A, al norte: la provincia de Oriente del departamento de

Boyacá; al oriente y al sur, el municipio de Gachalá; y al occidente, los municipios de Gama y Gachetá; esta última cabecera, de la provincia del Guavio, a la que pertenece Ubalá.

La ubicación geográfica de su cabecera es: 4º 43' latitud norte y 73º 32' de longitud oeste, a 1949 msnm. Se localiza en el sector A, el cual representa el 66,46 % de la extensión territorial (50,484 ha) y el restante 33,54 % corresponde al sector B.

Ubalá representa el 29,8 % del área de la provincia del Guavio, y está a una distancia de 107 km de Bogotá. Se encuentra conformado por 50 veredas, agrupadas 38 de ellas en seis inspecciones de policía; en torno del casco urbano yacen las doce restantes.

Sotó (Huila)

La vereda Sotó está ubicada en el centro del municipio de Baraya, el cual se encuentra en la región subnorte del departamento de Huila. Estas veredas y localidades tienen vocación agraria y ganadera, con alturas desde los 600 msnm hasta los 1900 msnm, lo que da cuenta de los importantes ascensos que se observan en sus carreteras y demás vías de acceso.

Metodología

Procedimiento

A partir de una caracterización territorial para cada una de las zonas a trabajar se procede a realizar las mediciones o pruebas de campo, que serán el insumo para la caracterización y el análisis de la cobertura y el servicio del operador WOM, con dispositivos comerciales y herramienta especializada. Las pruebas de interés son:

a. Dinámicas:

- Llamada en modo idle.
- Descarga de un archivo con tamaño de 1 Gb.

b. Estáticas:

- Llamada modo idle de 5 minutos.

- Llamadas VoLTE de 1 minuto.
- Pruebas *speedtest*.
- Navegación web.

La toma de pruebas inicia en el lugar de la ubicación de la antena y recorre la mayor cantidad de vías, sean vehiculares, carreteables, caminos veredales peatonales, trochas, ríos, entre otras. Las distintas pruebas se realizan de la siguiente manera:

a. Pruebas dinámicas:

- Con el teléfono en modo idle (datos apagados) *Drive-Walk test*.
- Con el teléfono en modo conectado (una prueba de descarga de un archivo con tamaño de 1Gb) *Drive-Walk test*.

b. Pruebas estáticas, 10 puntos de medición que garantizan la línea de vista con la estación servidora (con nivel mínimo de señal RSRP de -95 dBm) y con una separación mínima de 200 m entre puntos de medición (sin salirse de los 2 km de radio).

- 5 minutos de idle con datos apagados.
- Tres llamadas VoLTE con destino WOM o una línea fija de 1 minuto de duración cada una.
- 10 pruebas *speedtest*.
- Navegación web en tres páginas: www.wom.co; www.mintic.gov.co; www.eltiempo.com.

Estaciones (antenas)

La Esmeralda

Sector 1:

- Latitud: 4.38753.
- Longitud: -73.49805.
- Altura de la torre: 40 metros.
- Azimut: 150°.

- Antena No.: A704516R0v06.
- Identificador físico de celda: 24.
- Potencia máxima: 47,8.
- Identificador de celda: 122324.
- Departamento: Cundinamarca.

Para evidenciar la cobertura de la antena, se muestra una foto satelital suministrada por el Portal Territorial de Colombia (PTC):

Figura 23. La Esmeralda



Fuente: PTC (2024).

Gazajujo

Sector 1:

- Latitud: 4.65281.
- Longitud: -73.24293.
- Altura de la torre: 38 metros.
- Azimut: 135°.
- Antena No.: 4704516R0v06.
- Identificador físico de celda: 246.

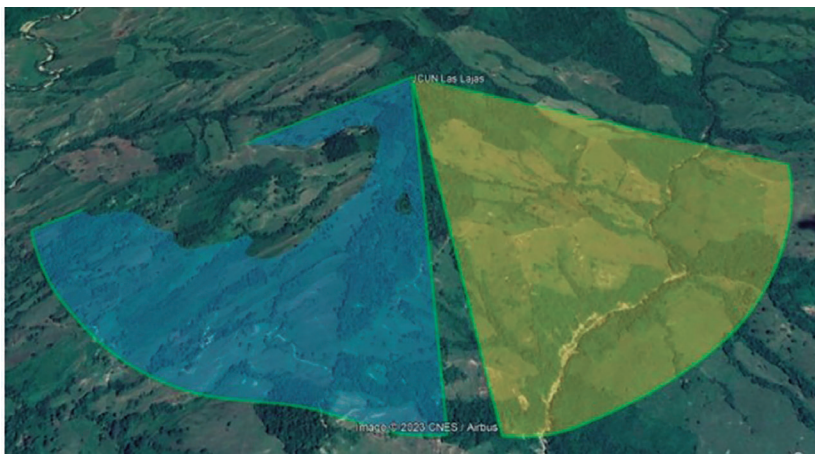
- Potencia máxima: 47,8.
- Identificador de celda: 121654.
- Departamento: Cundinamarca.

Sector 2:

- Latitud: 4.65281.
- Longitud: -73.24293.
- Altura de la torre: 38 metros.
- Azimut: 210°.
- Antena No.: 4704516R0v06.
- Identificador físico de celda: 247.
- Potencia máxima: 47,8.
- Identificador de celda: 121655.
- Departamento: Cundinamarca.

Por medio del *software* Xirius se logró obtener un esquema referente a la cobertura de ambas antenas hacia la zona a trabajar:

Figura 24. Cundinamarca



Fuente: PTC (2024).

Sotó

Sector 1:

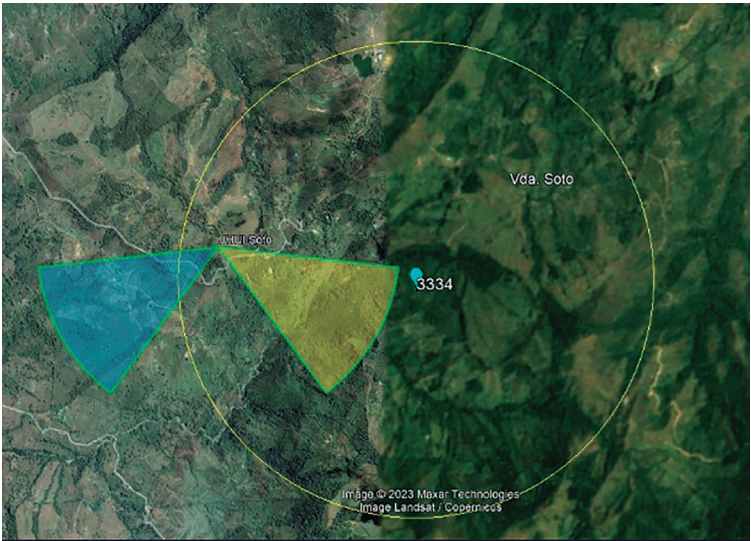
- Latitud: 3.120752.
- Longitud: -74.987498.
- Altura de la torre: 40 metros.
- Azimut: 120°.
- Antena No.: N45C-1XB1.
- Potencia máxima: 47,8.
- Identificador de celda: 125554.
- Región: centro.
- Departamento: Huila.

Sector 2:

- Latitud: 3.120752.
- Longitud: -74.987498.
- Altura de la torre: 40 metros.
- Azimut: 240°.
- Antena No.: N45C-1XB1.
- Potencia máxima: 47,8.
- Identificador de celda: 125555.
- Región: centro.
- Departamento: Huila.

En la siguiente imagen satelital se simula el área de cobertura de la estación base de Sotó. Esta torre cuenta con dos antenas; el área se interpreta por la zona verde clara, la primera, y la segunda, por la zona azul.

Figura 25. Huil



Fuente: PTC (2024).

Resultados

Haciendo uso de los *software* Qualipoc y G-NetTrack Pro se recopilaron una serie de datos correspondientes a cada zona; al procesar la información, se obtuvieron los siguientes hallazgos.

La Esmeralda, Cundinamarca

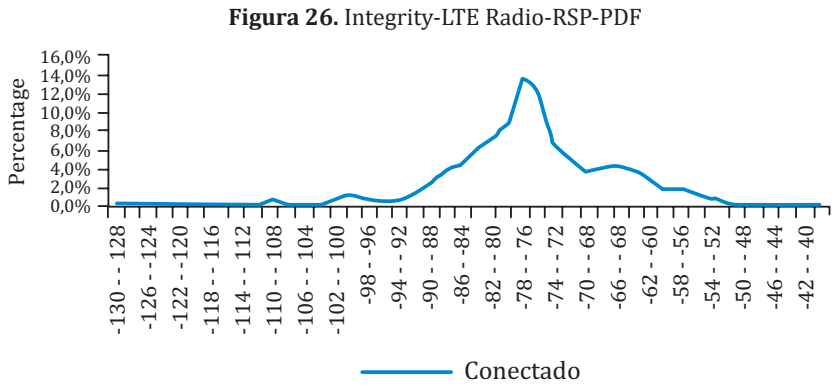
- Modo conectado; pruebas dinámicas; RSRP.

Durante las pruebas de la visita al lugar se logró obtener la información estadística consignada en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-1

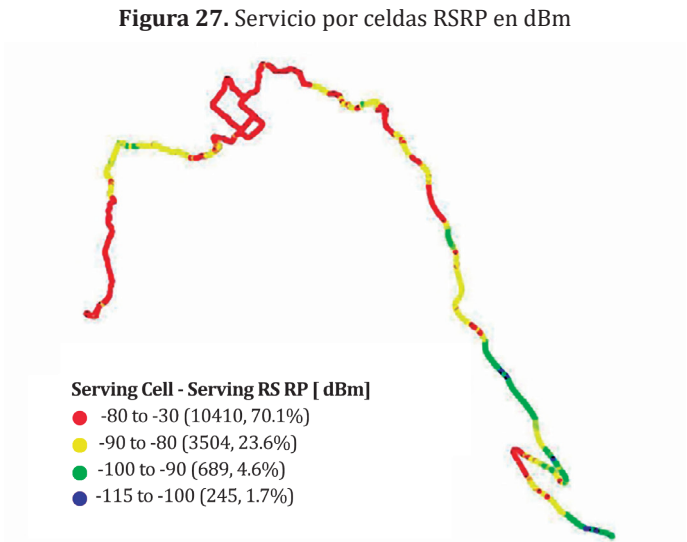
Canal	Data	Conectado
9460	Count	14848
	Avg (dBm)	-76,10
	Mín. (dBm)	-114,0
	Máx. (dBm)	-47,90
	StDev (dBm)	9,77

A partir de las mediciones alcanzadas, se llegó a la función de densidad de probabilidad graficada en la Figura 26.



Fuente: elaboración propia.

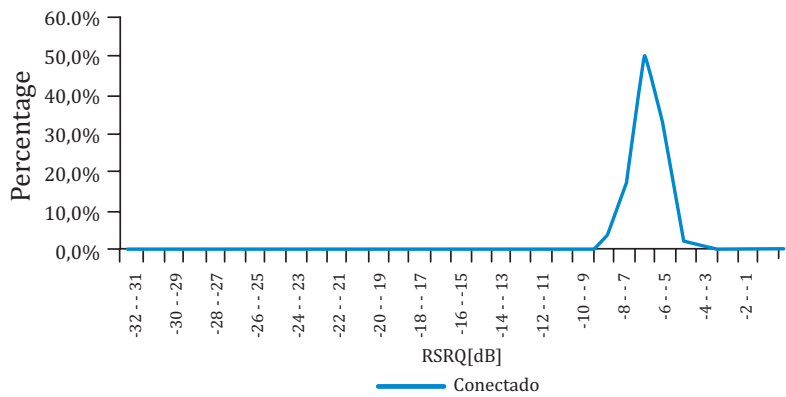
En la Figura 27 se observan los resultados más detallados del comportamiento en la ubicación exacta.



Fuente: elaboración propia.

Al aplicar la regla empírica para la distribución normal se tiene que el 95,45 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -95,64 dBm. Este parámetro cumple los requerimientos exigidos por el MinTIC.

Figura 28. Integrity-LTE Radio-RSRQ-PDF

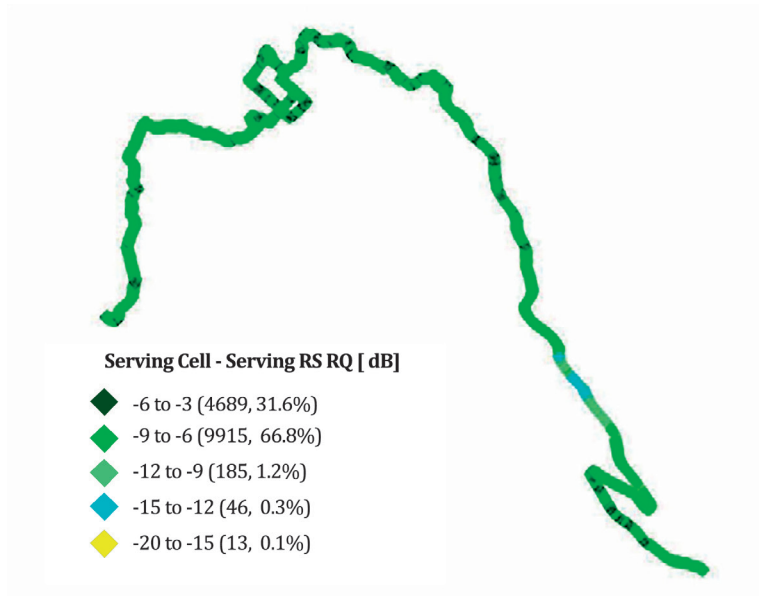


Fuente: elaboración propia.

RSRQ

Se obtiene la siguiente función de densidad de probabilidad al igual que un gráfico del comportamiento según la ubicación (Figura 29).

Figura 29. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

Por medio del gráfico es posible evidenciar, a partir del análisis de los porcentajes, el comportamiento que tiene la variable RSRQ. Se observa que únicamente 0,4 % de ellas se encuentran por debajo de los -12 db.

Pruebas estáticas

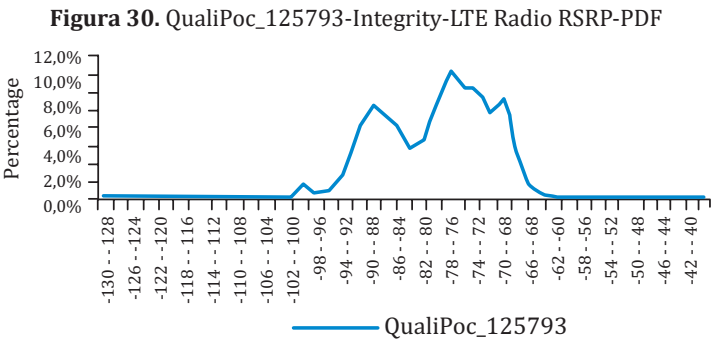
RSRP

A partir de los datos obtenidos en la visita se consignó la información contenida en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-2

Canal	Data	Qualipoc
9460	Count	7663
	Avg (dBm)	-79,51
	Mín. (dBm)	-104,00
	Máx. (dBm)	-62,00
	StDev (dBm)	7,98

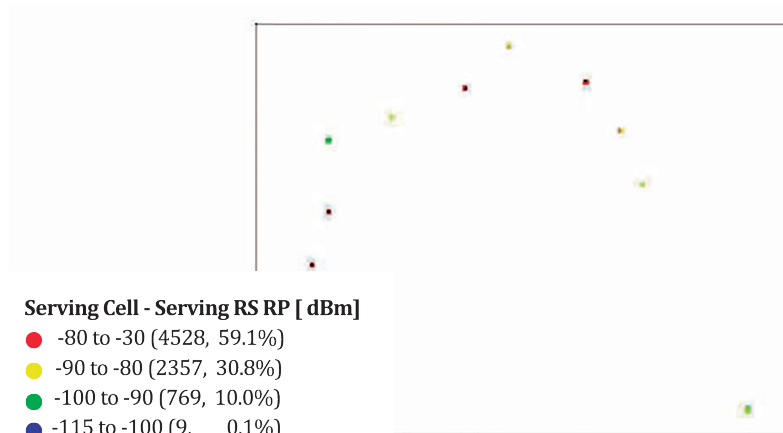
Con ello, se logra obtener la función de densidad de probabilidad ilustrada en la Figura 30.



Fuente: elaboración propia.

Al aplicar la regla empírica para la distribución normal se tiene que el 95,45 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -95,47 dBm; parámetro que cumple con los requerimientos exigidos por el MinTIC.

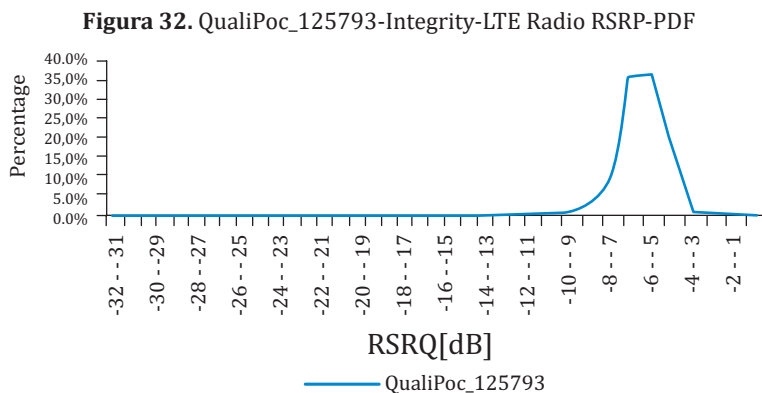
Tomando los puntos seleccionados (200 metros de distancia mínimos entre cada uno) se obtiene la Figura 31.

Figura 31. Servicio por celdas RSRP en dBm

Fuente: elaboración propia.

RSRQ

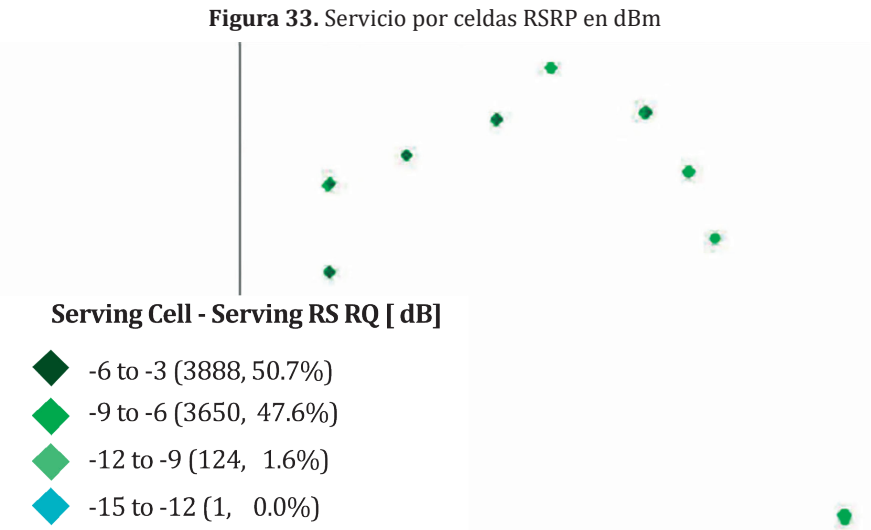
Se obtiene la función de probabilidad ilustrada en la Figura 32.



Fuente: elaboración propia.

En este caso, se observa que el 95,1 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentran en el rango entre -8 y -4 dB, cantidades que cumplen ampliamente los requerimientos exigidos por el MinTIC. Se toma como mínimo valor aceptable -12 dB, y los resultados se ubican en el 99,9 % de las mediciones en este rango.

Tomando los puntos seleccionados (200 metros de distancia mínimos entre cada uno) se obtiene el gráfico de la Figura 33.



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se observan los porcentajes de las mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal; se comprueba que menos del 0,01 % están por debajo de -12 dB.

Modo idle

Pruebas dinámicas

RSRP

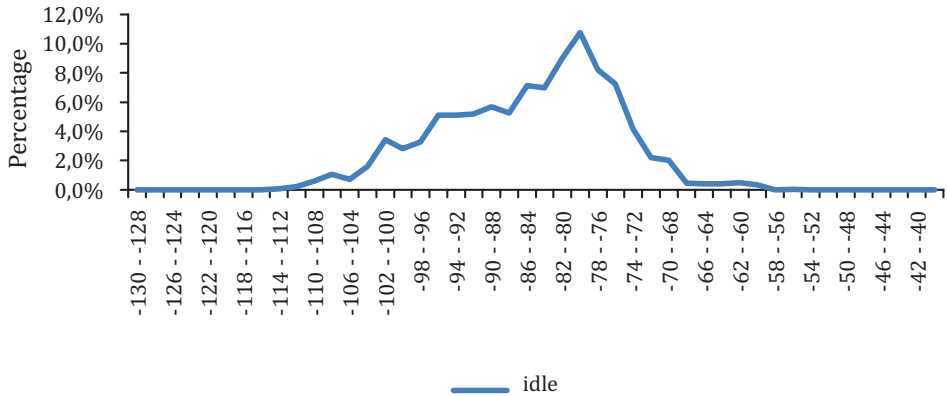
Se obtienen los datos estadísticos compilados en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-3

Canal	Data	Qualipoc
9460	Count	4777
	Avg (dBm)	-85,06
	Mín. (dBm)	-113,00
	Máx. (dBm)	-56,00
	StDev (dBm)	9,64

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se presenta en la Figura 34.

Figura 34. Integrity-LTE Radio Canal 9460-0



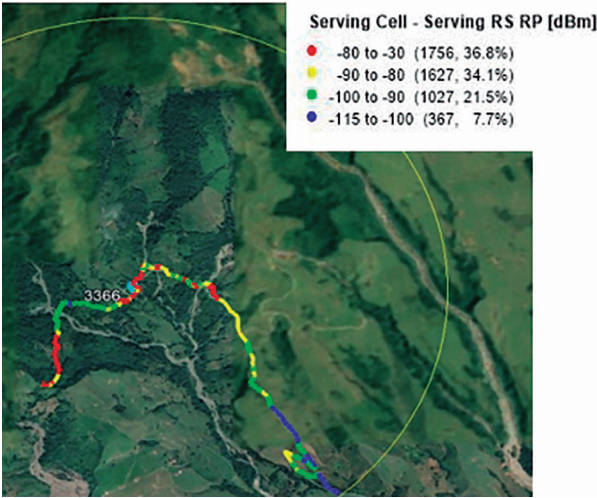
Fuente: elaboración propia.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 95,45 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -104.34 dBm, resultados que cumplen con los requerimientos exigidos por el MinTIC.

El cumplimiento de este parámetro se corrobora a través de los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, los cuales son complementarios con los presentados en la función de densidad de probabilidad. Las cantidades compiladas se presentan en la Figura 35.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidos por rangos de intensidades de señal; se comprueba que solamente el 7,7 % está por debajo del umbral de los -100 dBm. Esta medición permite confirmar el cumplimiento de los parámetros exigidos por el MinTIC.

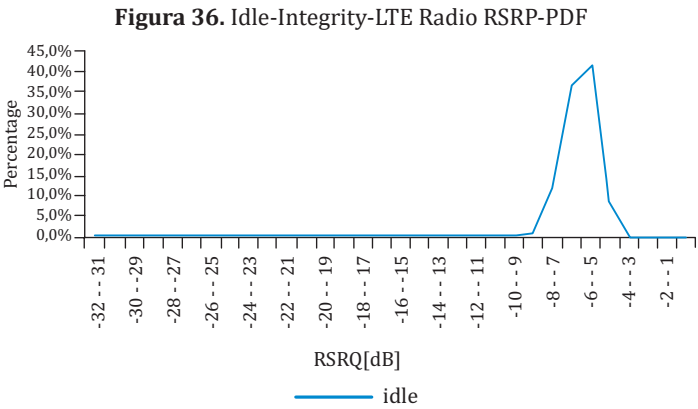
Figura 35. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

RSRQ

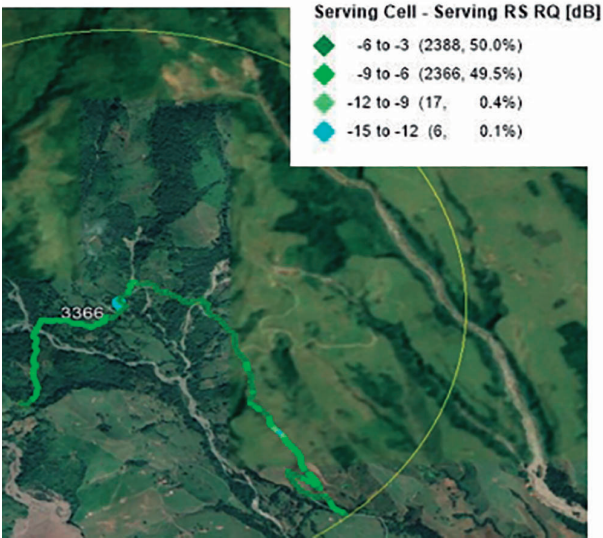
Se obtiene la función de densidad de probabilidad ilustrada en la Figura 36.



Fuente: elaboración propia.

Se observa que el 98,5 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentran en el rango entre -8 y -4 dB, resultados que cumplen con los requerimientos exigidos por el MinTIC. Posteriormente, se muestra una gráfica que detalla el comportamiento de la calidad de señal según la ubicación del recorrido.

Figura 37. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se evidencian los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal y se comprueba que solamente el 0,1 % está por debajo de -12 dB.

Gazajujo (Cundinamarca)

Modo conectado; RSRP.

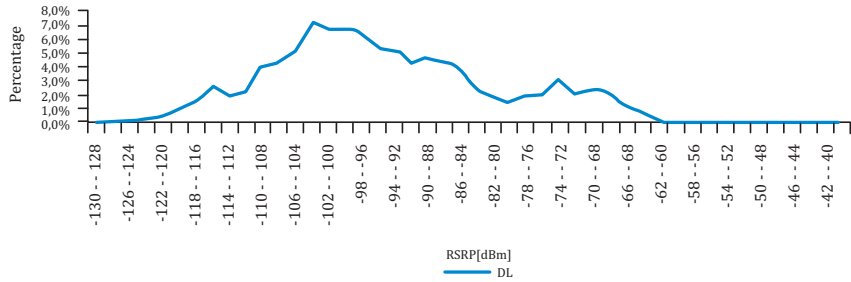
Se obtiene la información estadística correspondiente y se compila en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-4

Canal	Data	Qualipoc
9460	Count	18318
	Avg (dBm)	-94,51
	Mín. (dBm)	-126,40
	Máx. (dBm)	-58,50
	StDev (dBm)	13,35

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se exhibe en la Figura 38.

Figura 38. Integrity-LTE Radio Canal 9460

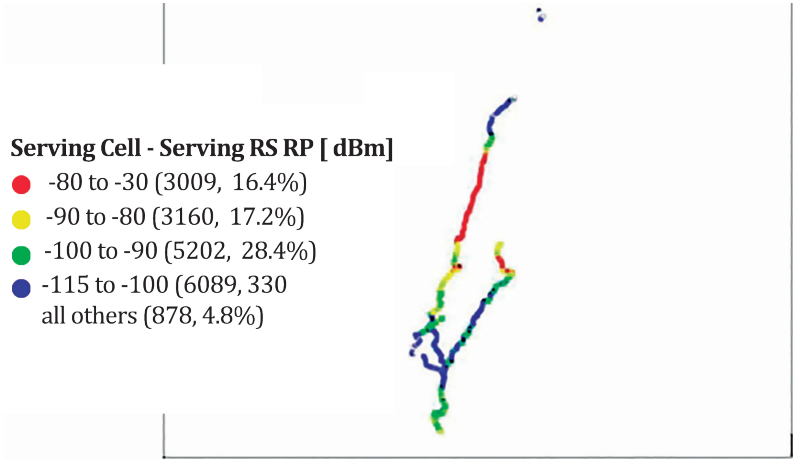


Fuente: elaboración propia.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 68,27 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -107,86 dBm, resultados que no cumplen con los requerimientos exigidos por el MinTIC.

Lo anterior, es complementario con los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, las cuales se presentan en la Figura 39.

Figura 39. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

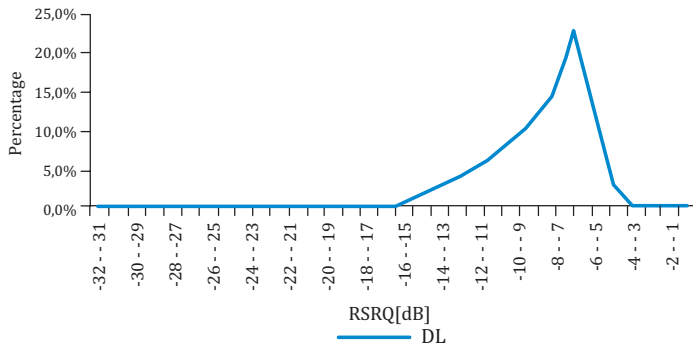
En la gráfica se muestran los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal; se comprueba que, entre el 33,2 % y el 38 % están por debajo del umbral de los -100 dBm. Por tanto, entre el 66,8 % y el 62 % de las mediciones cumplen con los niveles de potencia establecidos en

la resolución del MinTIC, pero al estar por debajo del 90 % del área total no cumplen con la cobertura exigida por el ministerio. Se configura, entonces, un incumplimiento por parte del PTC.

RSRQ

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se enmarca en la Figura 40.

Figura 40. Integrity-LTE Radio Canal 9460-2

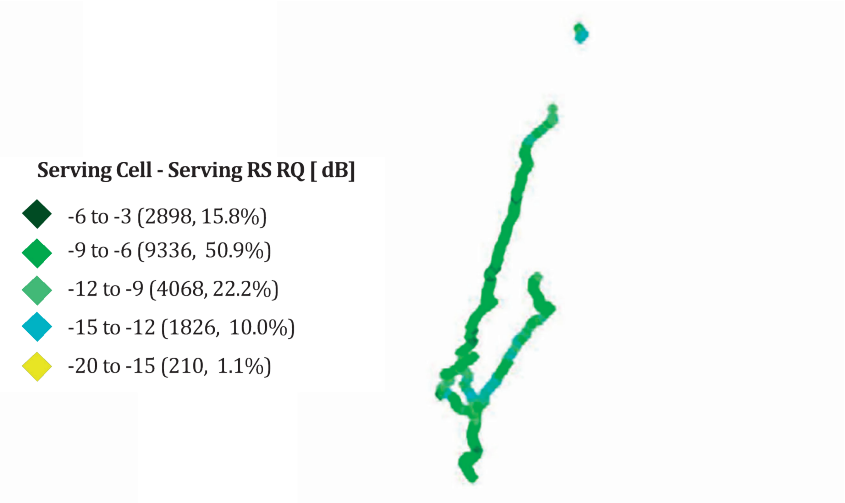


Fuente: elaboración propia.

En este caso, se observa que el 54,7 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentran en el rango entre -8 y -4 dB, parámetro que nos indica una buena calidad de la señal. Entretanto, si tomamos como -12 dB una medición como mínima aceptable, tendríamos un 88,9 % de señal con buena calidad, lo que indica que no alcanzaría a cumplir los requerimientos exigidos por el MinTIC.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal. Se comprueba que el 11,1 % están por debajo de -12 dB, lo que significa que el 88,9 % ofrecen una calidad superior al umbral señalado de -12 dB.

Figura 41. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

Pruebas estáticas

RSRP

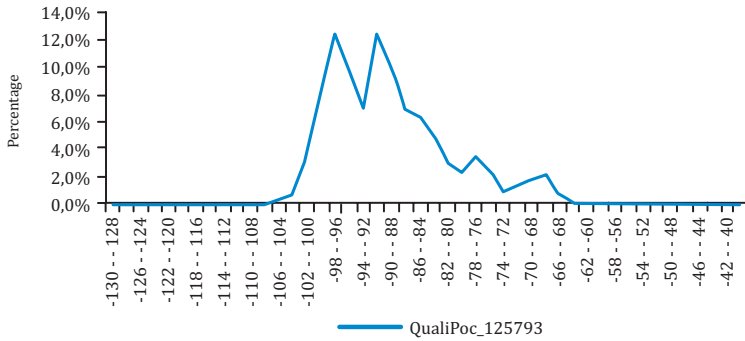
En la Tabla 6 se presenta la información estadística obtenida para este parámetro durante las pruebas realizadas en la visita al sitio.

Tabla 6. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-5

9460	Count	5918
	Avg (dBm)	-89,54
	Mín. (dBm)	-106,00
	Máx. (dBm)	-65,00
	StDev (dBm)	8,53

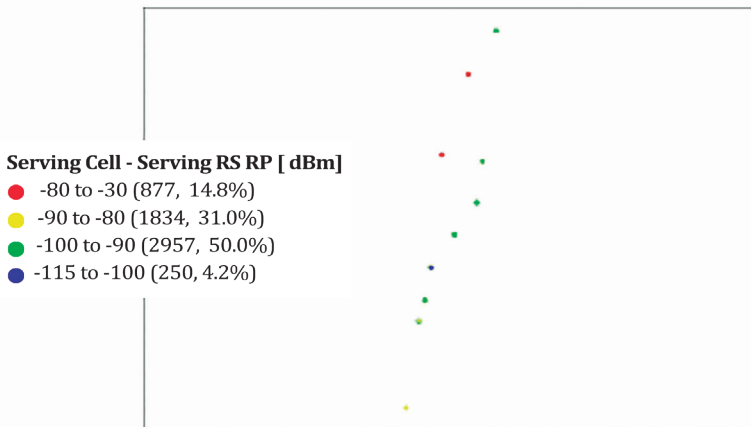
La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se ilustra en la Figura 42.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 68,27 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -98,07 dBm, resultados que aparentemente no cumplen con los requerimientos exigidos por el MinTIC.

Figura 42. Integrity-LTE Radio Canal 9460-3

Fuente: elaboración propia.

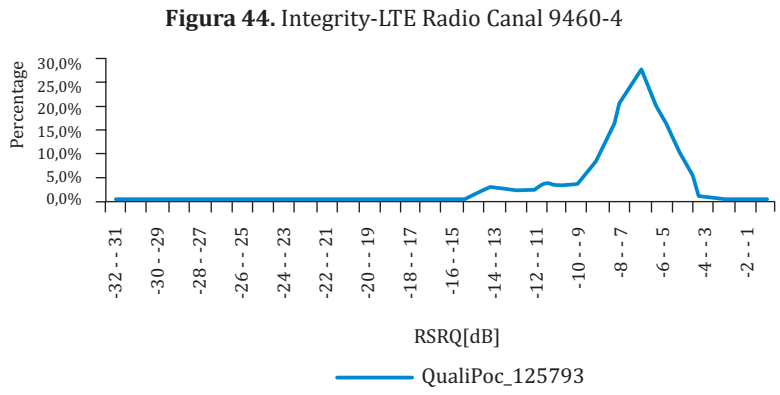
Por lo anterior, se recurre a los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, los cuales se presentan en la Figura 43.

Figura 43. Servicio por celdas RSRP en dBm

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 43 se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidos por rangos de intensidades de señal; se comprueba que solamente el 4,2 % están por debajo del umbral de los -100 dBm. Por tanto, en el 95,8 % de las mediciones se cumple con los requerimientos establecidos en la resolución del MinTIC. La aparente incoherencia entre la tabla con los datos estadísticos y la PDF se presenta por los dos picos de valores máximos observados en esta última gráfica.

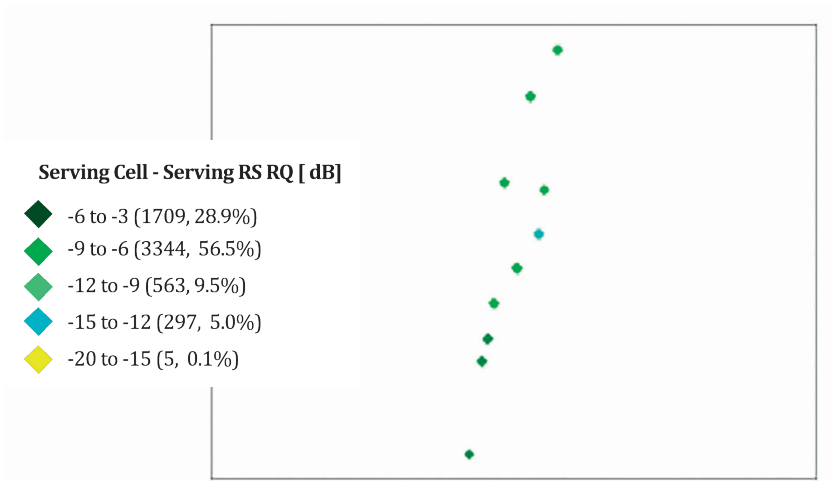
RSRQ



Fuente: elaboración propia.

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas es la siguiente: en este caso, se observa que el 76,8 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentran en el rango entre -8 y -4 dB; si tomamos como parámetro de -12 dB (una medición como mínima aceptable), se evidencia que se tiene un 94,9 % de señal con buena calidad, por tanto, se cumplirían ampliamente los requerimientos exigidos por el MinTIC.

Figura 45. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal. Se comprueba que 5,1 % están por debajo de -12 dB. Lo que significa que el 94,9 % ofrece una calidad superior al umbral señalado de -12 dB.

Modo idle

Pruebas dinámicas

RSRP

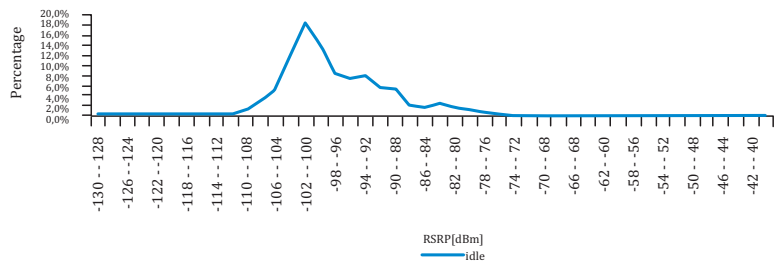
En la Tabla 7 se presenta la información estadística obtenida para este parámetro durante las pruebas realizadas en la visita al sitio.

Tabla 7. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-6

9460	Count	4890
	Avg (dBm)	-97,50
	Mín. (dBm)	-111,50
	Máx. (dBm)	-74,00
	StDev (dBm)	6,66

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se presenta en la Figura 46.

Figura 46. Integrity-LTE Radio Canal 9460-5

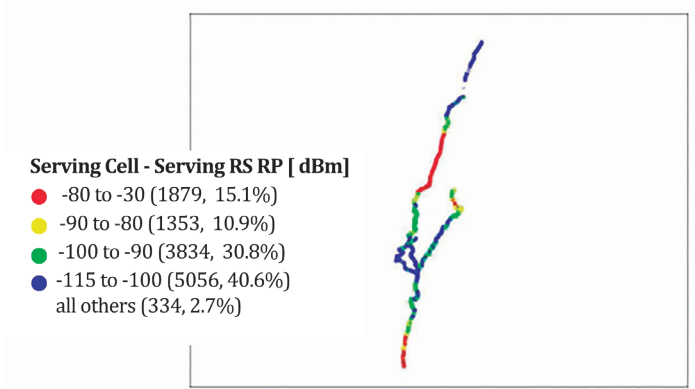


Fuente: elaboración propia.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 68,27 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -104,16 dBm, resultados que no cumplen con los requerimientos exigidos por el MinTIC. Lo anterior, es

complementario con los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, los cuales se presentan en la Figura 47.

Figura 47. Servicio por celdas RSRP en dBm



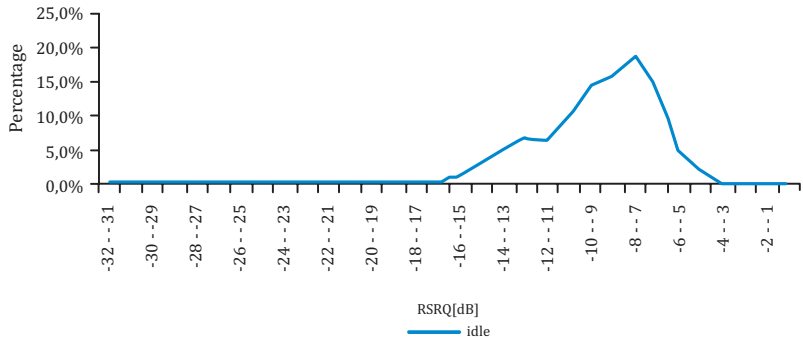
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se muestran los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal. Se comprueba que entre el 40,6 % y el 43,3 % están por debajo del umbral de los -100 dBm. Por tanto, entre el 59,4 % y el 56,7 % de las mediciones cumplen con los requerimientos establecidos en la resolución del MinTIC. Esto configura un incumplimiento por parte del PTC.

RSRQ

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se enmarca en la Figura 48.

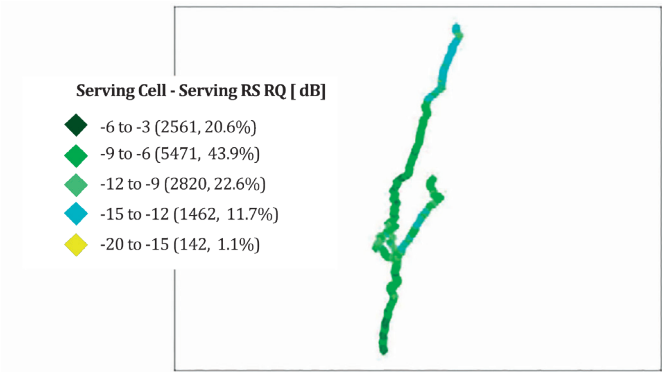
Figura 48. Integrity-LTE Radio Canal 9460-6



Fuente: elaboración propia.

En este caso, se observa que el 38,8 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentra en el rango entre -8 y -4 dB; si tomamos -12 dB como parámetro para considerar como valor mínimo aceptable para calidad de señal, sumaríamos 86,1 % de señal que cumpliría con este nivel, pero no alcanzaría el 90 % exigido como norma de ingeniería en los requerimientos determinados por el MinTIC.

Figura 49. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 49 se muestran los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal; se comprueba que solamente el 12,8 % están por debajo de -12 dB.

Sotó (Huila)

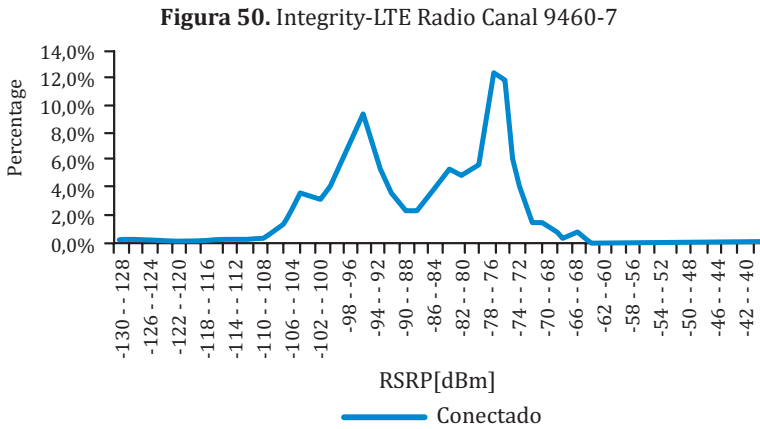
Modo conectado; pruebas dinámicas; RSRP.

En la Tabla 8 se presenta la información estadística obtenida para este parámetro durante las pruebas realizadas en la visita al sitio.

Tabla 8. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-7

9460	Count	23818
	Avg (dBm)	-86,55
	Mín. (dBm)	-130,90
	Máx (dBm)	-59,00
	StDev (dBm)	10,87

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se ilustra en la Figura 50.



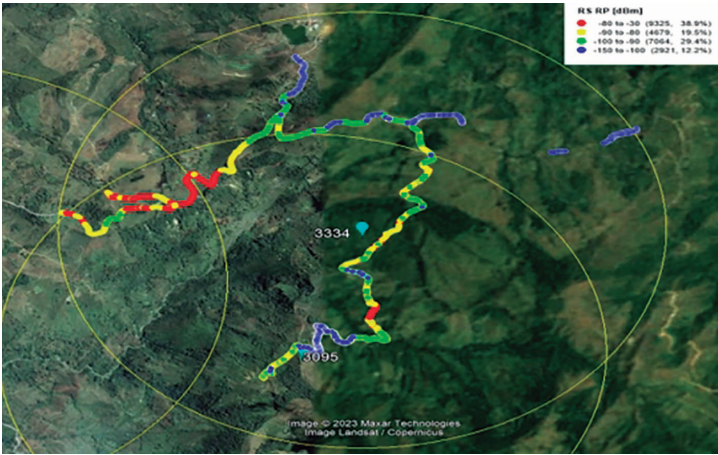
Fuente: elaboración propia.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 68,27 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -97,37 dBm, resultados que no cumplen con los requerimientos exigidos por el MinTIC. No obstante, cuando se realicen los análisis de Fresnel para las zonas que están por debajo de los -100dBm, se encontrará que son dadas por los importantes obstáculos naturales, como montañas de gran tamaño que obstruyen la línea de vista. Al descontar estas zonas, se evidencia que los niveles de RSRP en la localidad cumplirán con los parámetros exigidos por el MinTIC.

Lo anterior, es complementario con los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, los cuales se presentan en la Figura 51.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidos por rangos de potencia de señal; se comprueba que el 12,2 % de las muestras están por debajo del umbral de los -100 dBm. Por tanto, el 87,7 % cumple con los niveles de potencia establecidos en la resolución del MinTIC; no obstante, en los sectores donde la señal está por debajo del umbral de -100 dBm, se encuentran obstrucciones naturales causadas por grandes cerros que conforman el relieve de la zona y obstruyen la línea de vista.

Figura 51. Servicio por celdas RSRP en dBm

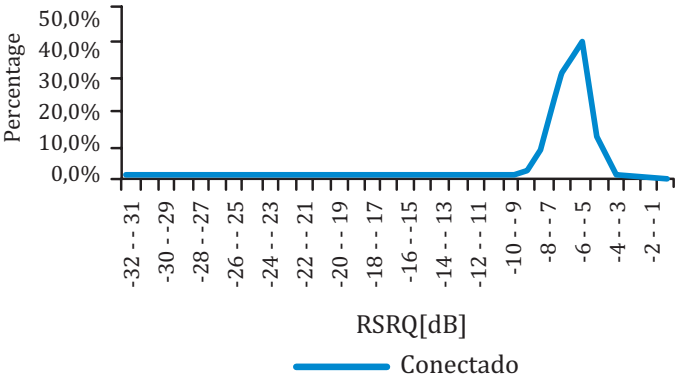


Fuente: elaboración propia.

RSRQ

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se enmarca en la Figura 52.

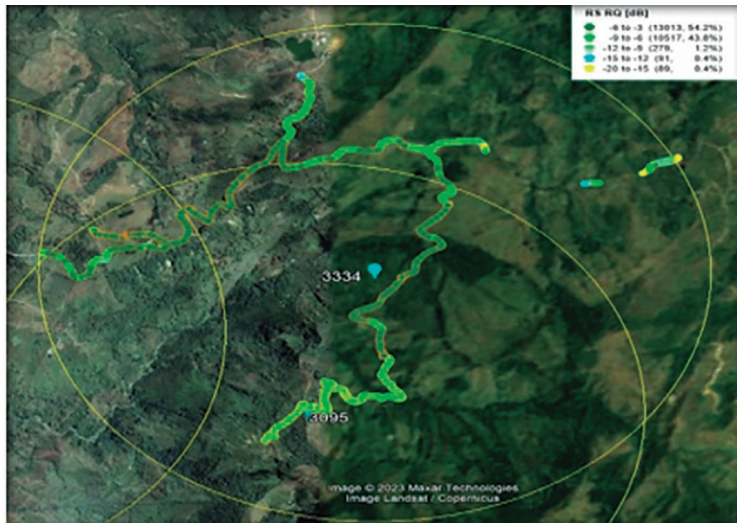
Figura 52. Integrity-LTE Radio Canal 9460-8



Fuente: elaboración propia.

En este caso, se observa que el 93,5 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentran en el rango entre -8 y -4 dB; si tomamos como -12 dB un valor mínimo aceptable, encontraríamos que se tiene un 99,1 % dentro de este rango.

Figura 53. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de calidad de señal. Se comprueba que solamente 0,8 % están por debajo de -12 dB.

Pruebas estáticas

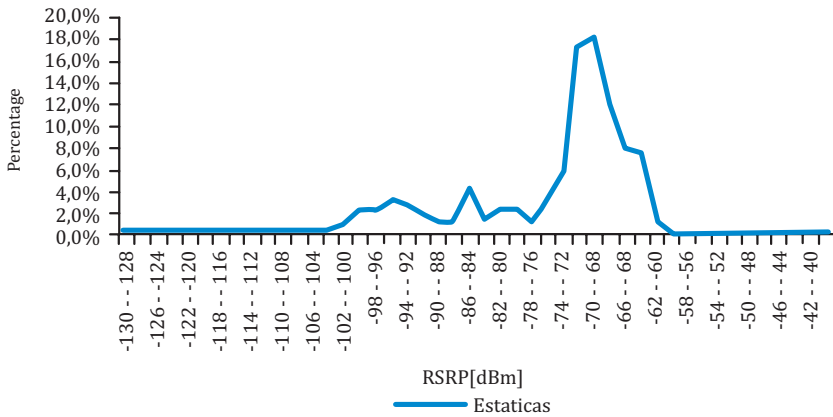
RSRP

En la Tabla 9 se presenta la información estadística obtenida para este parámetro durante las pruebas realizadas en la visita al sitio.

Tabla 9. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-8

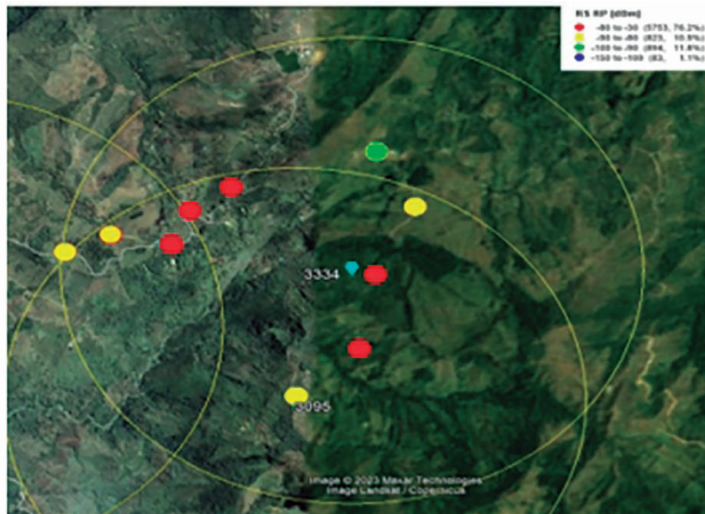
9460	Count	7553
	Avg (dBm)	-74,49
	Mín. (dBm)	-103,00
	Máx. (dBm)	-60,60
	StDev (dBm)	10,23

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se exhibe en la Figura 54.

Figura 54. Integrity-LTE Radio Canal 9460-9

Fuente: elaboración propia.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 68,27 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -84,72 dBm. Lo anterior, es complementario con los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, los cuales se presentan en la Figura 55.

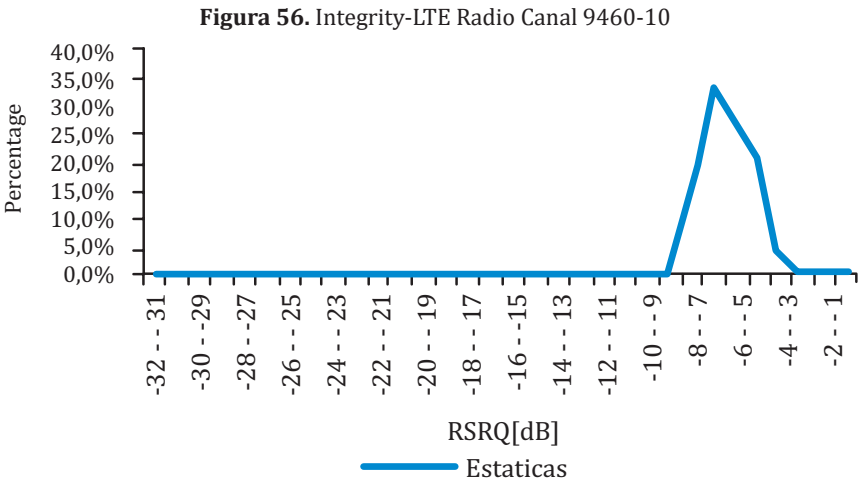
Figura 55. Servicio por celdas RSRP en dBm

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de intensidades de señal; se comprueba que solamente el 1,1 % están por debajo del umbral de los -100 dBm.

RSRQ

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se detalla en la Figura 56.

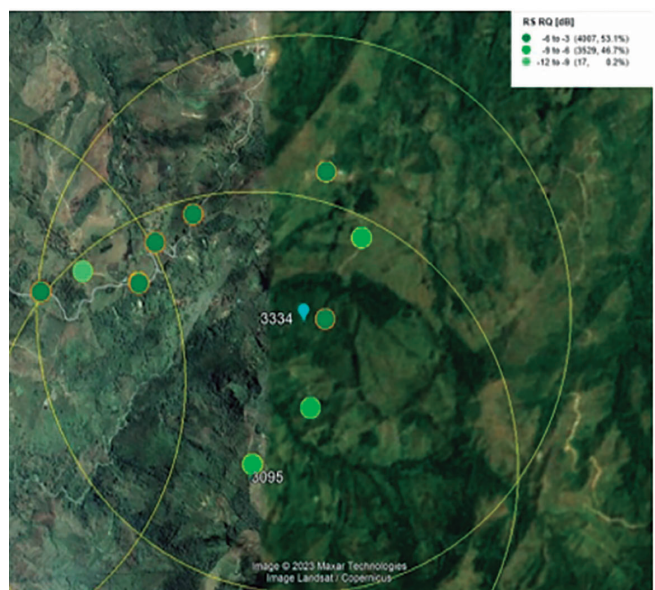


Fuente: elaboración propia.

En este caso, se observa que el 95,1 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se halla en el rango entre -8 y -4 dB. Si se toma como mínimo valor aceptable -12 dB, se encuentra que el 99,9 % de las mediciones está en este rango.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de calidad de señal; se comprueba que menos del 0,01 % están por debajo de -12 dB.

Figura 57. Servicio por celdas RSRP en dBm



Fuente: elaboración propia.

Modo idle

Pruebas dinámicas

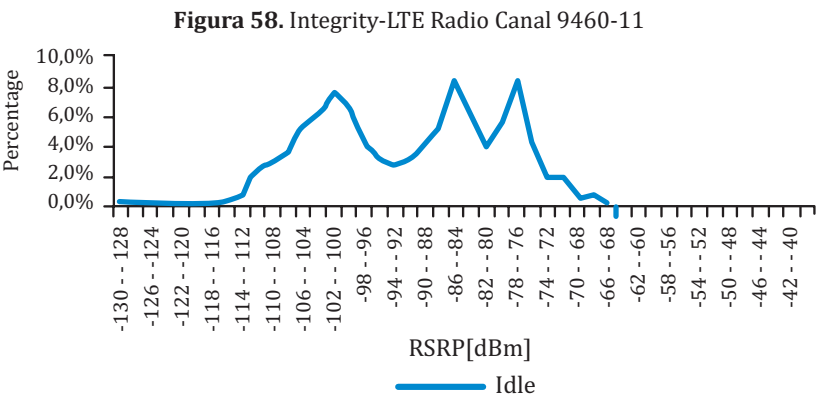
RSRP

En la Tabla 10 se presenta la información estadística obtenida para este parámetro durante las pruebas realizadas en la visita al sitio.

Tabla 10. Datos estadísticos de las mediciones obtenidas Canal 9460-9

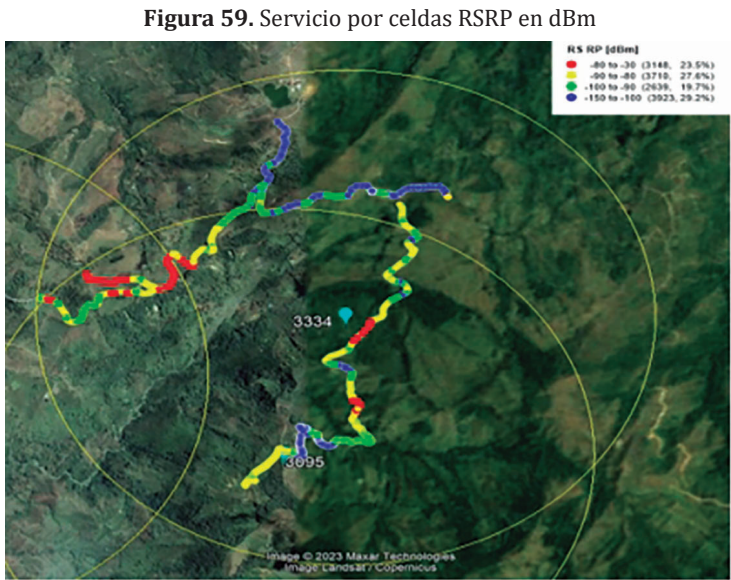
9460	Count	13391
	Avg (dBm)	-91,22
	Mín. (dBm)	-130,00
	Máx. (dBm)	-61,00
	StDev (dBm)	11,65

La función de densidad de probabilidad de las mediciones obtenidas se presenta en la Figura 58.



Fuente: elaboración propia.

Aplicando la regla empírica para la distribución normal, el 68,27 % de las mediciones del parámetro RSRP en modo conectado para la información obtenida se encuentran por encima de -102,87 dBm. El cumplimiento de este parámetro se corrobora a través de los datos georreferenciados observados durante las pruebas realizadas, los cuales son complementarios con los presentados en la función de densidad de probabilidad. Los resultados se presentan en la Figura 59.



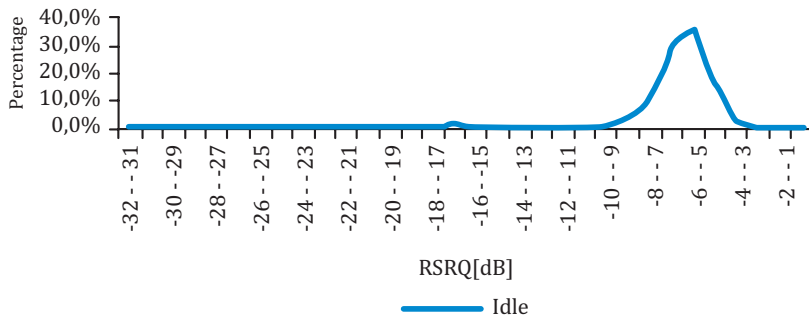
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se desglosan los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de calidad de señal; se comprueba que el 29,2 % están por debajo del umbral de los -100 dBm. Por tanto, solo el 70,8 % cumple con los requerimientos establecidos en la resolución del MinTIC. Teniendo en cuenta la explicación dada en el análisis en modo conectado, los sitios donde se presentan estos bajos niveles de señal están solapados por grandes cerros del relieve natural; se configura, entonces, una obstrucción irreparable a la línea de vista con la estación base desde estos sectores. En consecuencia, son zonas que no participan en la medición, según las indicaciones integradas en la resolución del MinTIC.

RSRQ

La función de densidad de probabilidad de las mediciones se muestra en la Figura 60.

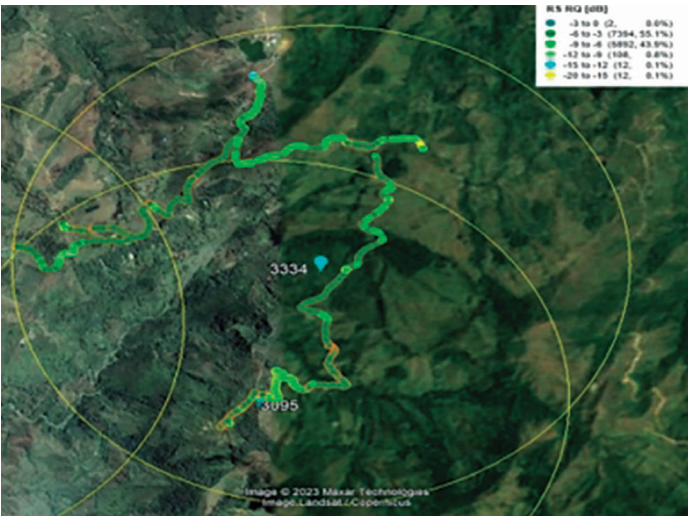
Figura 60. Integrity-LTE Radio Canal 9460-12



Fuente: elaboración propia.

En este caso, se observa que el 93,3 % de las mediciones del parámetro RSRQ en modo conectado para la información obtenida se encuentran en el rango entre -8 y -4 dB; si se toma -12 dB como parámetro para considerar como valor mínimo aceptable para calidad de señal, se sumaría 99,8 % en este rango.

Figura 61. Servicio por celdas RSRP en dBm



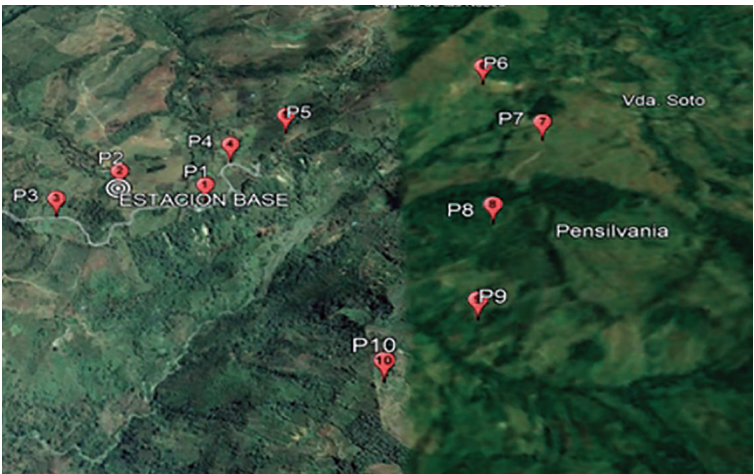
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica anterior se muestran los porcentajes de mediciones obtenidas por rangos de calidad de señal; se comprueba que solo el 0,1 % están por debajo de -12 dB.

Pruebas estáticas

Se seleccionaron las ubicaciones detalladas en la Figura 62.

Figura 62. Puntos estáticos tomados sobre el mapa de la localidad



Fuente: elaboración propia.

Velocidades de DL y UL

En la Tabla 11 se muestra el resumen de las velocidades de DL y UL de las pruebas.

Tabla 11. Velocidades de DL y UL

Punto No.	Latitud	Longitud	Download (Mbps)	UpLoad (Mbps)
1	3,120323	-74,983634	16,067	9,899
2	3,121056	-74,987461	11,719	9,76
3	3,119704	-74,990323	22,66	11,83
4	3,122906	-74,982576	19,06	9,246
5	3,12468	-74,980083	22,43	10,8
6	3,127413	-74,971047	6,617	4,029
7	3,123232	-74,968717	15,583	8,114
8	3,117954	-74,971197	13,999	9,162
9	3,112294	-74,972159	21,12	9,82
10	3,108644	-74,976031	7,79	2,034

De acuerdo con este estudio, se visualiza que la conectividad es muy regular. En algunas zonas no hay conectividad 3G, un aspecto que debe ser evaluado como política pública; se debe exigir a los operadores de telefonía celular mejorar la conectividad a las torres desplegadas en el país.

Capítulo 7. Redes 5G para revolucionar la agricultura inteligente

Uno de los retos fundamentales en el sector agropecuario es la ampliación de las redes de comunicaciones para mejorar la cobertura y llegar a los territorios rurales en los que se encuentran los procesos agropecuarios. En estas zonas es necesario optimizar la latencia de la red y su velocidad; por tal motivo, la implementación de redes 5G es la solución ideal para conectar la ruralidad con el mundo y fortalecer la adopción digital del agro inteligente.

¿Qué es una red 5G?

Las redes 5G o de quinta generación de telecomunicaciones son la evolución de las redes de las telecomunicaciones móviles. Hacen uso de la administración de redes por *software* para mejorar los parámetros de calidad del servicio; la red 5G está diseñada para aumentar la velocidad, reducir la latencia y mejorar la flexibilidad de los servicios inalámbricos. En las ciudades se tiene la percepción de que hay una amplia cobertura de la red, lo que en realidad no es parcialmente cierto, pues no hay un acceso total a la red y la calidad no es óptima. La instalación de esta tecnología permitirá explotar los servicios de las ciudades inteligentes por la facilidad de instalación de las antenas y los atributos que estas manejan.

El acceso a internet en las zonas rurales es limitado y se atiende por medio de redes comunitarias gestionadas por radio enlaces y la instalación de redes de Starlink; aun así, quedan grandes extensiones de terreno desatendidas, es allí donde la tecnología 5G fortalecerá la conexión y se podrá acceder a aquellos lugares en los que la demanda puede superar la capacidad actual de la tecnología 4G.

Las redes 5G están diseñadas para tener una arquitectura de acceso distribuido que facilite el procesamiento de datos y mejore los tiempos de respuesta en los procesos digitales. Las redes 5G perfeccionan la velocidad, la latencia y la cobertura, y, en teoría, garantizan mayor velocidad que las redes 4G. En la Tabla 12 se describen las velocidades según el tipo de red. Obsérvese cómo entre cada cambio de tecnología el aumento de velocidad es alto, pero el más alto de todos yace en la transición de 4G a 5G.

Tabla 12. Comparación de velocidades

	2G	3G	3G HSPA+	4G	4G LTE-A	5G
Velocidad máxima	0,3 Mb/s	7,2 Mb/s	42 Mb/s	150 Mb/s	De 300 Mb/s a 1 Gb/ss	De 1 Gb/s a 10 Gb/s
Media de velocidad	0,1 Mb/s	1,5 Mb/s	5 Mb/s	10 Mb/s	De 15 Mb/s a 50Mb/s	A partir de 50 Mb/s

Beneficios de la red 5G

El principal aporte de la red 5G es el aumento de la velocidad, la disminución de la latencia y la ampliación de cobertura; además, esta red tiene más canales de transmisión y mayor capacidad para conectar múltiples dispositivos simultáneamente, lo que fortalecerá las redes de IoT.

El avance más significativo vendrá de la mano de la velocidad; el 5G permitirá navegar con una velocidad de hasta a 10 Gbps (*gigabytes* por segundo); será 10 veces más rápido que las principales ofertas de fibra óptica del mercado. A ese ritmo se podrá, por ejemplo, descargar una película completa en cuestión de segundos.

Como aspectos para resaltar se tiene que esta red cuenta con una tasa de datos de hasta 10 Gbps, 10 o 100 veces mejor que las redes 4G y 4.5G; la

latencia de 1 milisegundo; una banda ancha 1000 veces más rápida por unidad de área; hasta 100 dispositivos más conectados por unidad de área (en comparación con las redes 4G LTE); disponibilidad del 99,999 %; cobertura del 100 %; y reducción del 90 % en el consumo de energía de la red.

Otro elemento fundamental, es el modelo de arquitectura, ya que la red se descompone y desagrega en 5G, lo que añade capacidades de alta computación al borde de los procesos; al contrastarlo con las condiciones rurales, específicamente del sector agropecuario, se generará una nueva revolución en el despliegue y uso de servicios medidos por las nuevas tendencias de IoT, inteligencia artificial y *big data*.

Red 5G para conectividad en agricultura inteligente

El 5G apalanca la conectividad necesaria para optimizar y automatizar este tipo de agricultura, lo que potencia la transmisión de datos a la nube involucrada en la analítica de tiempo real y la comunicación de máquina a máquina. Es decir, mejora sustancialmente el procesamiento de datos agrícolas.

De este modo, sensores instalados en los campos recogen y transmiten datos. Estos son analizados mediante inteligencia artificial para identificar patrones y necesidades. Así, se vigilan condiciones del suelo, como cantidad de agua, nutrientes o temperatura, con el fin de prevenir situaciones desfavorables en los cultivos.

Como resultado, los agricultores obtienen mayor rendimiento de cosechas, alimentos de mejor calidad y, frecuentemente, ganancias más altas.

Interconectividad entre fincas

Las TIC, con sus nuevos paradigmas, han cambiado la forma en que se ve el sector agropecuario. La explosión de sensores y la conectividad han permitido llevar los procesos de automatización a nuevos niveles, pero aun con estas ventajas los productores tienen temor de introducir estas tecnologías a sus procesos.

Al analizar el funcionamiento de una granja se observan procesos separados e independientes. Con la implementación de la tecnología 5G se trazarán cada uno de los procesos dentro de uno solo, con una mayor interconectividad,

que permitirá maximizar la producción en términos generales, aprovechar los recursos, disminuir desperdicios y aumentar la productividad.

Si una finca está totalmente interconectada se podrá aprovechar toda la información para la toma de decisiones; en este sentido, en un espacio que contempla varias fincas con iguales o diferentes procesos se aumentará la posibilidad de conocer mejor el territorio. La tecnología 5G posibilita la interconectividad, brinda mayor acceso a gran parte del territorio, mejora los procesos de producción y conecta a los pobladores con el resto del mundo, lo que garantiza más justicia digital.

Sistema de monitoreo

Uno de los elementos fundamentales del IoT es la capacidad de integrar un número casi infinito de sensores en un proceso; este concepto se vuelve poderoso cuando un proceso agropecuario puede trabajarse en varias hectáreas, por ejemplo, la producción de ganado. Una muestra puntual son los sensores que se encuentran en las vacas para su seguimiento y registro de valores de los tratamientos suministrados; las redes 5G potencializan los sistemas de monitoreo y amplían la cobertura.

Como las redes 5G mejoran la velocidad y la latencia de los sistemas de monitoreo, los cambios de los cultivos se podrán observar en tiempo real y detectar enfermedades o plagas en una etapa temprana (Telcel, 2022). Se podrá, entonces, mitigar el riesgo y optimizar el sistema de costos e inversiones por pérdidas.

Un elemento fundamental de las redes 5G es que garantizan la conectividad y cobertura, lo que permite interconectar la información capturada por las redes IoT con otras bases de datos, bien sea climatológicas o de otro tipo. Los predictores de información ayudarán a una adecuada toma de decisiones que, si se integran a sistemas inteligentes, el cultivo por sí solo podrá tomar decisiones independientes.

Estos sistemas de monitoreo se transforman en sistemas de IoT masivos, en los que se combinan redes de sensores de baja potencia, como el monitoreo de la calidad del aire del agua, las redes inteligentes de energía y el seguimiento de plagas y enfermedades.

En definitiva, los sistemas de monitoreo con redes 5G potencializan el conocimiento del territorio y de los cultivos. Además de automatizar procesos generan sistemas de alerta temprana, lo que garantiza de cierta manera el cuidado de los cultivos y la mejora en la producción.

Maquinaria independiente

Las redes 5G se configuran como el internet de las máquinas, un escenario en el que estas tienen la capacidad de acceder a datos comunes para la toma de decisiones. Al respecto, una operación logística de una máquina puede ser compartida y usada por otra, lo que crea una experiencia colaborativa. No solo se necesita la salida a internet, al tener redes distribuidas se pueden generar redes de borde para compartir estas experiencias de información.

Las máquinas inteligentes son grandes orquestadoras de servicios, como los de IoT, realidad aumentada y sistemas cognitivos dentro de la inteligencia artificial. También, hacen uso de otros servicios mediados por internet, como *big data* y analítica de datos.

Casos de uso prometedores

La red 5G presenta algunos casos de uso de interés (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2022a):

- Telepresencia: una videoconferencia de próxima generación, como videochat o *streaming* de video bajo demanda, con la cual se podrán realizar videoconferencias de alta calidad en el sector rural y fortalecer los procesos educativos; la telepresencia puede usar realidad virtual y realidad aumentada.
- Internet táctil: una evolución de las redes de IoT que permite la interacción háptica con la retroalimentación visual, por tanto, se tendrá la percepción de la manipulación por medio del tacto; así, se podrán controlar robots humanoides para labores de siembra y recolección y mejorar la interacción máquina-humano.
- Manufactura inteligente que permite el flujo continuo de datos para conocer el estado de un proceso en tiempo real, información del almacén,

inventarios, flujos de procesos y riesgos, que son elementos que las redes 5G pueden fortalecer a partir de una logística inteligente.

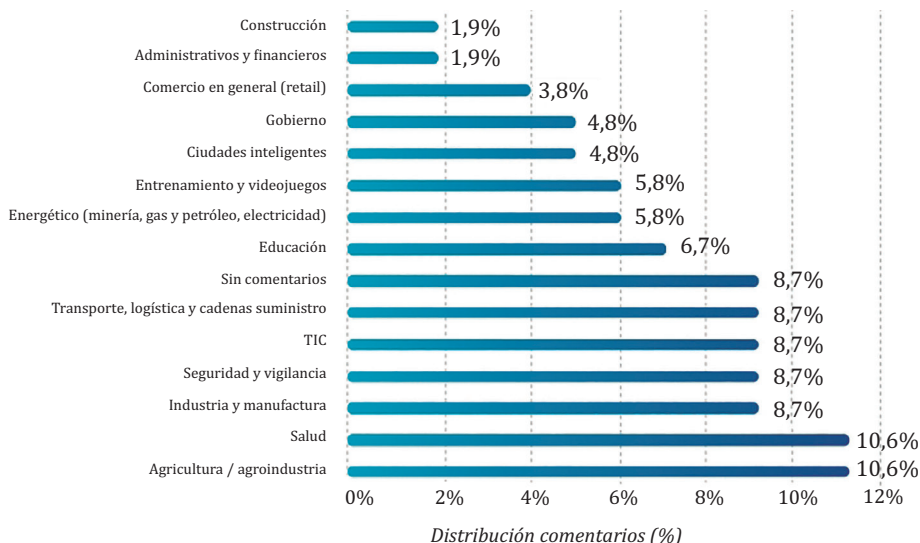
- Vigilancia de alta calidad y analítica de datos para garantizar la seguridad, no solamente de la infraestructura o de los elementos de trabajo, sino también el monitoreo de salud de las personas; esto transforma la manera en que concebimos la seguridad en el trabajo, debido a que se tendrán datos en tiempo real.
- Soluciones de misión crítica, como el monitoreo continuo de la calidad de agua o los sistemas de alimentación y vigilancia de condiciones meteorológicas para la protección de los cultivos, los cuales son fortalecidos por las redes 5G.
- Experiencias inmersivas en el territorio dentro de los cultivos, que pueden ser fortalecidas por las redes 5G con modelos de aprendizaje remoto; esto podrá fortalecer los procesos técnicos por medio de la educación y facilitar la formación empresarial de los agricultores.
- Bases de datos masivas en diferentes formatos, como archivos de imágenes 3D e información no estructurada.
- Manejo de desastres con mayor capacidad para monitorear y analizar múltiples eventos; esto también fortalecerá los sistemas de respuestas y de logística para ayudas humanitarias.
- La agricultura de precisión es el conjunto de tecnologías que se aplican al trabajo en el campo, como sensores, imágenes y datos geográficos (Neyra, 2021); estos elementos sirven para comprender el territorio y tomar decisiones informadas. Algunos usos de la agricultura de precisión pueden ser: protección de cultivos, cosechas y rastreo y monitoreo de animales.
- *E-commerce*, que consiste en la compra y venta de productos o servicios por medio de medios electrónicos; las redes 5G permiten la conexión continua a la red para facilitar las operaciones comerciales y gestionar cobros, pago, pedidos y asesoría.

Redes 5G en Colombia

En la Consulta Pública de Desarrollo 5G en Colombia (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2022a) participaron 22 agentes, entre asociaciones gremiales, empresas (fabricantes y operadores), academia y personas naturales; se realizaron diferentes preguntas, y para el sector agropecuario se plantearon las siguientes.

Una de las preguntas fue: ¿en qué sectores productivos considera que será de mayor aplicación las redes y servicios bajo tecnología 5G? En los resultados se puede observar que los dos sectores con mayores respuestas fueron salud y agricultura (Figura 63).

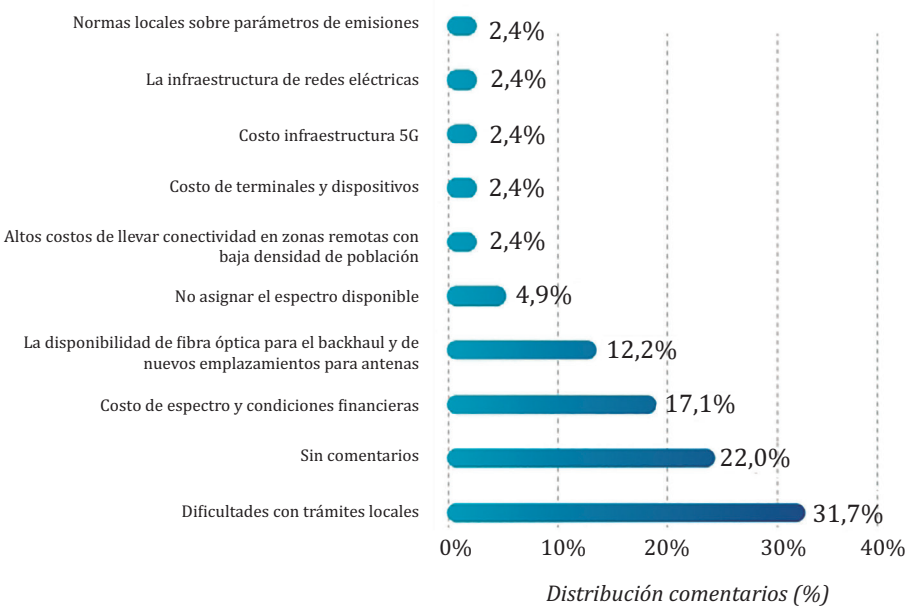
Figura 63. Sectores productivos de mayor aplicación redes y servicios bajo tecnología 5G



Fuente: elaboración propia.

Otra pregunta de interés fue: ¿qué barreras ha identificado con el despliegue de la red 5G? La respuesta con mayor valor fue trámites locales, lo que evidencia falta de normatividad que propenda facilitar la instalación de estas redes.

Figura 64. Barreras de despliegue



Fuente: elaboración propia.

Capítulo 8. Políticas rurales en Colombia

Históricamente el país ha tenido un rezago frente a la adopción de tecnologías en el sector agropecuario; en este capítulo se analiza el entorno normativo de Colombia desde el punto de vista agropecuario y la agricultura 4.0 o AgroTECH, que es una tendencia. Del conjunto de leyes, decretos y resoluciones y documentos Conpes, se logra visualizar la moderación de los pasos normativos, aunque no se puede afirmar que han sido inexistentes.

Inicialmente, el acercamiento tecnológico se llevó desde la consolidación de la información, lo que decantó en un conjunto de iniciativas para construir este tipo de sistemas. Desafortunadamente, no fueron concebidos desde un marco de referencia de arquitectura única, por lo que la integración o las consultas de bases de datos no fue significativa; la visión de estos sistemas en su esencia era consolidar registros de información para realizar análisis de datos.

Por su parte, el Plan de Desarrollo 2022-2026 “Colombia, potencia mundial de la vida”, propone cinco ejes transformadores, los cuales, desde la tecnología para el sector agropecuario presentan retos de interés. El primer eje es el ordenamiento del territorio alrededor del agua; el tercero, es el derecho humano a la alimentación; el cuarto, es la transformación productiva, internacionalización y acción climática; y el quinto, es la convergencia regional.

Cada uno de estos ejes invita a la digitalización del sector para garantizar su seguimiento.

El artículo 9 del Plan de Desarrollo mencionado, refiere la coordinación interinstitucional para el control y la vigilancia contra la deforestación y otros crímenes ambientales; con esta propuesta se busca luchar contra la deforestación que afecta los recursos naturales. Entre los entes responsables se encuentra el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), entidad que debe consolidar acciones para detener la deforestación, así como rehabilitar, recuperar y realizar restauración ecológica a partir del monitoreo y el análisis de información a través de la red de estaciones meteorológicas.

Los procesos de medición de deforestación obedecen a la reglamentación internacional que promueven los sellos verdes, cuya intención es garantizar que los productos que se vendan por fuera del país estén libres en su proceso de producción de actividades de deforestación. De ahí que una de las formas de realizar estos análisis sea por medio de imágenes satelitales que brinden un análisis temporal, que generalmente es de cuatro años; a partir de esto, se busca comprender el proceso de deforestación en un cultivo, además del uso de satélites, que en el caso de la Unión Europea es la constelación Copernicus. Estas acciones también ayudan a mejorar la resolución con vuelos de dron.

El artículo 27 de dicho Plan busca articular una estrategia nacional para el control del tráfico ilegal de fauna silvestre; se propone detener esta problemática por medio del control y la prevención para evitar esta práctica ilegal. Esto, a partir de la educación en los derechos de los animales, la generación y respuesta ante alertas tempranas, y en su aplicación, garantizar el uso de IoT y las redes 5G, las cuales adquieren mayor importancia con la instalación de redes de monitoreo etológicos para detectar la fauna y los animales de un territorio; no solamente para conocer las rutas y la presencia de estos, sino para que a partir de este conocimiento se puedan implementar planes de conservación ambiental que protejan los territorios.

Por su parte, el artículo 28, que aborda las regiones autonómicas, busca mejorar la gestión pública eficiente para el desarrollo económico, social, ambiental, cultural y étnico con el fin de facilitar el desarrollo regional, sobre

todo en lugares con difíciles condiciones sociales y económicas. Su foco de impacto es el de movilizar sus capacidades de desarrollo.

Otro elemento de este artículo es incorporar de manera integral la atención y prevención del riesgo por efecto de fenómenos naturales en la planificación y gestión del desarrollo regional, así como ampliar la conectividad y comunicación local y regional para reducir las brechas económicas y sociales. Estas regiones autonómicas, vistas desde una arquitectura de comunicaciones, permiten desplegar mayor capacidad de gestión de la información; es desde las nuevas tendencias de las redes 5G que se pueden realizar acciones en un territorio rural, que en su mayoría es agropecuario.

Lo anterior, combinado con sistemas IoT que responden al conocimiento del riesgo para consolidar mayores bancos de información con mayor cobertura territorial, lo cual, combinado con inteligencia artificial, pueden prevenir el riesgo por efecto de fenómenos naturales o antrópicos.

En el artículo 36, que enmarca los distritos de adecuación de tierras, se busca priorizar la financiación para terminar los actuales distritos de riego multipropósito, así como la construcción de nuevas iniciativas multipropósito en zonas de alta productividad agrícola. Esto puede fortalecerse con sistemas de monitoreo y consolidación de territorios agrícolas digitales.

Finalmente, el artículo 37, que cita la obligatoriedad del uso de la información oficial, busca que las entidades públicas suministren y dispongan la información oficial, por lo cual el MinTIC en sus planes de digitalización sugiere la implementación de arquitecturas empresariales. Al respecto, propone el marco de referencia 2.0 de la arquitectura TI.

En la Figura 65 se observan diferentes dominios del modelo de arquitectura empresarial, con preeminencia de interés por el dominio de la arquitectura de información. Esta última, se define como la estructura con la cual la información y los datos están representados y almacenados.

Sobre los cultivos, el artículo 52 aborda procesos de investigación, asistencia técnica, capacitación, transferencia de tecnología y diversificación de cultivos, coordinados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Asimismo, en esta adopción tecnológica, el artículo 53 crea el Sistema de Administración del Territorio (SAT), que es el conjunto de procesos, acuerdos

interinstitucionales, marcos legales, estándares, infraestructuras de datos y tecnologías que se requieren para facilitar la colaboración armónica entre los distintos niveles de decisión pública.

Figura 65. Dominios del modelo de arquitectura empresarial



Fuente: MinTIC (2022).

Uno de los artículos de interés es el 142, el cual refiere la conectividad digital para cambiar vidas; por medio de seis acciones busca mejorar la conectividad, sobre todo en el sector rural. La primera acción es llevar conectividad digital a zonas vulnerables y apartadas y mejorar la cobertura y calidad de los servicios de telecomunicaciones a través de diferentes tecnologías y la compartición de infraestructura. La segunda acción es hacer de internet y de las tecnologías digitales un instrumento de transformación social.

La tercera acción es desplegar infraestructura para mejorar la conectividad digital del país con redes neutras, cables submarinos, fibra óptica, tecnología satelital, entre otras tecnologías, mediante diversos mecanismos, entre ellos, la coinversión entre el Estado y los actores privados. La cuarta acción es promover la eliminación de barreras por parte de las entidades territoriales o nacionales, para el despliegue de redes de telecomunicaciones.

La quinta acción es adelantar la asignación del espectro. Y la sexta acción es fortalecer a los pequeños prestadores de los servicios de telecomunicaciones con el fin de aportar en el cierre de la brecha digital.

El artículo 143 menciona la transformación digital como motor de oportunidades e igualdad; indica que se deben implementar iniciativas de transformación digital como herramientas para la productividad, la generación de empleo, la dinamización de la economía en las regiones y la potencialización de la economía popular.

Otro elemento de importancia es extender la cobertura, este propósito se menciona en el artículo 193. Con el acceso a las TIC y el despliegue de infraestructura se busca mayor cubrimiento de las redes de telecomunicaciones en las entidades territoriales, lo cual fortalecerá los procesos de apropiación digital.

Normativamente, el Ministerio de Agricultura contempla un conjunto amplio de leyes, decretos y resoluciones, los cuales fueron analizados desde 1993 hasta la fecha. Desde esta normatividad desarrollamos el siguiente apartado.

Uno de los pilares de la agricultura inteligente tiene que ver con la sostenibilidad eléctrica. Con la Ley 2268 del 3 de agosto de 2022 se expiden normas para garantizar beneficios sociales focalizados a los pescadores artesanales, comerciales y de subsistencia, así como establecer mercados, plantas de hielo y almacenamiento con frío, y otras facilidades de soporte necesarias para el manejo y la distribución de recurso pesquero y sus derivados. También, busca mejorar equipos electrónicos de navegación que se usan para la pesca y acuicultura a partir de energías alternativas.

La transformación digital enfocada al comercio electrónico se trata en la Ley 2239 del 8 de julio de 2022, en la que se regula la actividad del agroturismo en Colombia. En el punto 11 busca fomentar proyectos de transformación digital, *e-commerce*, en plataformas de tecnología, para la promoción del turismo rural virtual y comercialización de la oferta turística. Esto se puede trazar desde las redes de comunicaciones y la realidad aumentada para el agroturismo.

Entretanto, los sistemas de información geográfica (SIG) se convirtieron en elementos del conocimiento del territorio fundamentales para la toma de decisiones. Por ejemplo, en la Ley 2206 del 17 de mayo de 2022 sobre el uso productivo de la guadua y el bambú se aclara que la identificación se debe realizar a través de los SIG; asimismo, en el artículo 50 se habla de los sistemas de información geográfica para garantizar el manejo sostenible, la planificación de uso, la protección de guaduales y bambusales, así como la trazabilidad de los productos obtenidos.

Por su parte, en el entorno de las leyes se identifica la necesidad de construir diversos sistemas de información. Para el caso del Ministerio de

Agricultura y Desarrollo Rural, la Ley 2183 del 6 de enero de 2022 aborda los insumos agropecuarios en el artículo 9, que refiere las fuentes de información acerca del Sistema de Reporte de Información de Insumos Agropecuarios (Siriiagro).

En la Ley 2178 del 30 de diciembre de 2021, en el artículo 6, se crea el Sistema de Información para la Gestión de Riesgos Agropecuarios (Sigra), con el propósito de fomentar el conocimiento, la generación, el análisis y el uso de la información sobre los distintos riesgos que afectan la actividad agropecuaria, forestal, pesquera y de la acuicultura.

Asimismo, la Ley 2169 del 22 de diciembre de 2021 habla sobre el desarrollo bajo en carbono del país, mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono, neutralidad y resiliencia climática, y se dictan otras disposiciones en el sector ambiente. En estas últimas, se propone crear, diseñar e implementar, a 2028, un Sistema Integrador de Información sobre Vulnerabilidad, Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (Siivra), que permita monitorear y evaluar la adaptación al cambio climático en Colombia; también, indica que a 2030 se implementará el 100 % del piloto del Sistema Nacional de Información de Cambio Climático (Snicc).

Esta ley dicta instrucciones para el sector agropecuario y señala que se deben implementar modelos que mejoren sus capacidades para adaptarse a la variabilidad y el cambio climático a través de la investigación, el desarrollo tecnológico y la adopción de prácticas de transformación productiva de las actividades agrícolas y ganaderas, para hacerlas más resilientes.

Asimismo, define medidas para la transformación productiva mediante la implementación de tecnologías de última generación (genética, biotecnología, agricultura 4.0, metabolómica y demás herramientas tecnológicas necesarias para cumplir la meta).

Por otro lado, en la Ley 2046 del 6 de agosto de 2020, el Gobierno nacional, en el marco de la Mesa Técnica Nacional de Compras Públicas Locales de Alimentos, deberá diseñar un sistema de información pública que articule los diferentes datos relacionados con pequeños productores locales agropecuarios y productores pertenecientes a la agricultura campesina, familiar y comunitaria.

Estos sistemas de información también se construyeron para cultivos particulares, por ejemplo, con la Ley 1969 del 11 de julio de 2019 se creó el fondo de estabilización de precios del café y se propuso la creación del Sistema de Información Cafetero (Sica) (Federación Nacional de Cafeteros, 2023).

Y por último, con la Ley 1876 del 29 de diciembre de 2017, se creó el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria y se definió el desarrollo y uso de nuevas TIC para impulsar, apoyar o soportar los distintos procesos de gestión del conocimiento que hacen parte de la extensión agropecuaria; asimismo, se creó la plataforma Siembra, que es un aplicativo electrónico del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural destinado a la recopilación, la gestión, la divulgación y el seguimiento de la información de los proyectos, resultados, avances y oferta tecnológica sectorial originada en el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (Snia) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023).

De la misma manera, el uso de estaciones climáticas se contempla en la Ley 2178 del 30 de diciembre de 2021, que trata sobre seguros agropecuarios; en el artículo 5, que aborda las estaciones meteorológicas y los servicios climáticos, se consigna que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible se encargará de proveer herramientas provistas por el Sistema de Información Geográfico, como imágenes obtenidas a través de sensores remotos, drones, entre otros, para alimentar el Sistema de Información para la Gestión de Riesgos Agropecuarios.

La política más representativa en los desafíos tecnológicos hacia el sector agropecuario es el Conpes 4081 de 2022 (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2022), una normativa destinada a financiar el proyecto de iniciativas climáticamente inteligentes para la adaptación al cambio climático y la sostenibilidad en sistemas productivos agropecuarios priorizados.

Se ha identificado que el sector agropecuario colombiano presenta baja capacidad técnica para reducir su vulnerabilidad al cambio climático, lo cual repercute en su competitividad y productividad, en gran medida debido a una reducida oferta tecnológica y de servicios especializados hacia la adaptación de los sistemas productivos agropecuarios para mitigar los efectos de la variabilidad climática. Al respecto, se espera implementar sistemas de agricultura digital y servicios climáticos para modernizar los servicios de

extensión agropecuaria y proveer recomendaciones de adaptación y mitigación que apoyen la reducción de los riesgos agroclimáticos y la pérdida de cultivos.

Dentro de este Conpes, en el apartado de justificación, se indica que el sector agropecuario enfrenta grandes desafíos para promover una agricultura climáticamente inteligente en un contexto de un clima cambiante; asimismo, se encuentra una reducida oferta tecnológica y de servicios climáticos para la adaptación y mitigación de sistemas productivos agropecuarios al cambio climático.

El documento indica que el país no cuenta con sistemas de monitoreo, aunque en efecto existen varios sistemas, como el del Valle de Aburrá (Siata) (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá), y el del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (Sire), que aportan valiosa información en el contexto urbano. No obstante, se identifica una deficiencia para la implementación y apropiación de estos sistemas en el sector rural, asimismo, señala que faltan modelos informáticos que estén ajustados al contexto del país, debido a que en la compra de tecnología, por ejemplo de radar, los modelos están ajustados para otras latitudes, lo que causa una alta incertidumbre en los datos; también, faltan herramientas digitales para capturar o analizar información valiosa que apoyen la toma de decisiones, lo que hace que los sistemas de producción agropecuarios sean aún más vulnerables al clima. Por lo anterior, el acceso por parte de pequeños productores agropecuarios a herramientas digitales es limitado.

En este mismo Conpes, se evidencia una capacidad limitada en el registro y manejo de información, tanto climática (por ejemplo, registros meteorológicos históricos, pronósticos climáticos estacionales) como de cultivos (por ejemplo, fisiología, humedad del suelo, equilibrio de nutrientes, plagas y enfermedades), para apoyar la toma de decisiones climáticamente inteligentes.

Aunque se ha trabajado en la digitalización del agro, en el Conpes 4081 de 2022 se hace énfasis en la gran brecha en la tecnología para llevar herramientas de la era digital, como drones, sensores y análisis de imágenes satelitales a los gremios. Estas herramientas permitirían a los agricultores (y a los técnicos que los asesoran) prepararse mejor para los eventos climáticos extremos y la variabilidad climática.

En efecto, se indica que existe una inadecuada formación de técnicos y productores con el dominio y la comprensión de estas herramientas informáticas, y la conexión de las predicciones agroclimáticas con plataformas de *big data*, con el fin de contextualizar cada recomendación de acuerdo con el sitio específico y de esta forma mejorar los procesos de extensión agropecuaria.

Como conclusión, el Conpes 4081 de 2022 define que el proceso de desarrollo y transferencia de tecnología es lento y limitado para la adaptación y mitigación del cambio climático para la mayoría de los cultivos, por tanto, es necesario invertir en el desarrollo y la transferencia de tecnologías para la adaptación y mitigación; esto se enlaza con los modelos económicos que se pueden derivar del sector, los cuales actualmente están limitados y podrían promover una agricultura climáticamente inteligente.

A su vez, el Conpes 4081 de 2022 define un conjunto de objetivos específicos para la adopción al agro inteligente; el primer objetivo planteado es implementar sistemas agrícolas digitales y servicios climáticos para modernizar los servicios de extensión agrícola y brindar recomendaciones de adaptación y mitigación que apoyen la reducción de riesgos agroclimáticos y la pérdida de cultivos; el segundo objetivo es desarrollar, validar y ampliar tecnologías como el mejoramiento genético, técnicas de manejo de cultivos y otras tecnologías para aumentar la resiliencia y el desarrollo agrícola bajo en carbono; el último objetivo, es fortalecer las capacidades de los productores, técnicos e instituciones para la adopción e implementación de tecnologías, y proponer nuevos modelos de negocio basados en la adopción masiva de tecnologías bajo consideraciones ambientales, sociales y de género.

Ahora, desde el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el 2021 se implementaron diez planes piloto en pequeños y medianos cultivos de las cadenas productivas de café, cacao y aguacate, ubicados en ocho departamentos del país, como resultado del programa Agro 4.0 (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2022b). Los pilotos consistieron en la instalación de tecnologías emergentes, como sensores de medición con IoT, almacenamiento y análisis de datos con *Cloud Computing*, análisis de suelos con inteligencia artificial, toma de fotos satelitales y comercio electrónico, entre otros.

Adicionalmente, en el 2023, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones presentó AgroTECH (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2023), un proyecto con el que se buscaba, a través de paneles y conversaciones, discutir sobre la inteligencia artificial que sirve para potencializar la evolución del campo. Asimismo, quiso impulsar el futuro de la agricultura y la apropiación del término AgroTECH en el país, es decir, digitalizar el campo.

Normativamente, la Unión Europea aprobó el 31 de mayo de 2023 el nuevo reglamento relativo a la comercialización en el mercado de la Unión y la exportación desde la Unión de determinadas materias primas y productos asociados a la deforestación y la degradación forestal. El reglamento busca promover cadenas de suministro libres de deforestación.

Finalmente, desde la adopción de tecnologías se han realizado convocatorias para trabajar en esta norma, como el programa AL-INVEST Verde, que busca propuestas innovadoras para el financiamiento de proyectos de economía verde en beneficio de las pymes de América Latina. Este tiene como objetivo específico el uso de productos, procesos, tecnologías y servicios menos contaminantes y más eficientes en el uso de los recursos, al tiempo que los países adoptan modelos de consumo más sostenibles. La idea es convertir los retos climáticos y medioambientales en oportunidades.

Capítulo 9. Comunidades para agricultura inteligente

La concepción de la agricultura inteligente ha llevado a que las empresas realicen una transición tecnológica, esto genera un conjunto de retos enlazados al impacto en las comunidades y a la adopción de las mipymes; por tal motivo, la propuesta desarrollada se resume en la construcción de comunidades para agricultura inteligente, pensando en el impacto al territorio y el rol de las comunidades que, en respuesta a sus necesidades y en colaboración con otras organizaciones, comprenden el territorio en sus complejidades y dinámicas para conocer sus problemáticas, y a partir de esto, plantear los proyectos.

Por lo anterior, y para desplegar proyectos en el sector rural, se proponen cuatro etapas básicas (Figura 66). La primera, consiste en comprender y analizar el territorio, esto con la intención de entender los requerimientos que en realidad se necesitan; este proceso permitirá calcular los anchos de banda y las capacidades, así como los elementos que parecieran fundamentales, como las capacidades energéticas. Es probable que en un efecto el impacto pueda ser un componente de comunidades energéticas para garantizar la alimentación de los dispositivos.

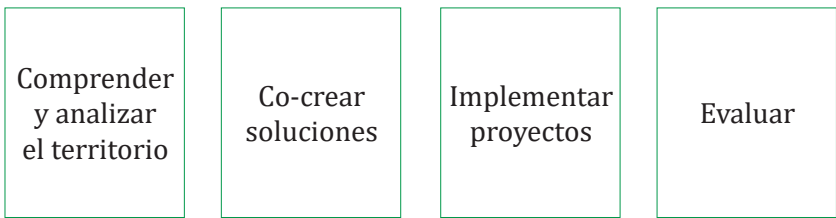
Es necesario que los equipos de diseño analicen el territorio y lo mapeen en su comportamiento ambiental. Debido a que Colombia es un país de difícil predicción meteorológica, una solución debe contemplar diferentes aspectos climatológicos, además, el territorio debe verse también desde la logística de la implementación, como la adecuación de los caminos veredales, que son los de mayor uso. En este sentido, es necesario dimensionar los procesos de transporte.

Además de planear el proceso de ingeniería, es necesario comprender los aspectos comunitarios para identificar el impacto de las soluciones, ya que es necesario que los proyectos tengan impacto y puedan mantenerse en el tiempo.

Para analizar el terreno se puede levantar una cartografía en la que diferentes fuentes de datos tendrán que interactuar, asimismo, el conocimiento experto, el comunitario y los análisis posteriores de bases de datos permiten la toma de mejores decisiones informadas.

Finalmente, en esta etapa se deben realizar pruebas de suelo, captura de fotos e imagen, bien sea de drones o de satélites; inicialmente, es recomendable instalar estaciones de monitoreo ambiental para comprender cómo se comporta el territorio. Entre más información, más conocimiento se genera.

Figura 66. Etapas de implementación de proyectos para comunidades de agricultura inteligente



Fuente: elaboración propia.

La segunda etapa corresponde a los procesos de diseño y co-creación de las propuestas de los proyectos. Para el caso de las comunidades de agricultura inteligente, es necesario comprender los tipos de cultivos que ese territorio en particular soporta; esta información se levantó en la etapa uno, en la que el diálogo con las comunidades es la clave para el éxito del proyecto.

Al respecto, se debe comprender la problemática y a partir de esto construir con las comunidades la idea del proyecto, esto, con el fin de que hagan parte desde un principio de las propuestas y garantizar que se comience con el proceso de apropiación social.

La etapa tres es la implementación del proyecto, que no solo se refiere al componente tecnológico. Es en esta etapa donde se inicia el proceso de formación de las comunidades para que, además de apropiarse de la solución, aprendan a manejarla y sobre todo a interpretar la información que se entrega. Es importante desplegar la arquitectura y sus principios para no perder el foco del impacto.

En la etapa cuatro se entrega el proyecto y se realiza la evaluación en varios momentos; se debe tener en cuenta los errores y los aciertos debido a que el proyecto puede ser replicado en otro sitio o aumentar su impacto al ser llevado a un cultivo más grande o a varios cultivos. Por ello, es importante pensar en su empaquetamiento y escalamiento.

Servicios de agricultura inteligente

Las comunidades para agricultura inteligente en general tienen seis servicios (Figura 67). En primer lugar, se observa el servicio de energía, el cual se trabaja desde comunidades energéticas para garantizar la generación de energía para el autoconsumo.

El servicio de energía se debe cruzar con la política pública de las comunidades energéticas. Toda la infraestructura debe ser monitoreada, los cultivos, el suelo, el ambiente y los procesos, los cuales, en caso de riesgo se convertirán en críticos. Estos escenarios cambian de acuerdo con los eventos, lo que genera diferentes comportamientos emergentes mediados por inteligencia artificial.

La agricultura inteligente hace uso de diversos dispositivos que consumen energía, por tanto, garantizar su existencia es fundamental. La pérdida de un cultivo no solamente es la pérdida del producto y el dinero que se invirtió, sino que se debe volver a acondicionar el lugar e iniciar de nuevo el proceso de siembra, lo que podría generar pérdida para un pequeño cultivador con consecuencias no deseadas.

Figura 67. Servicios para agricultura inteligente

Energía	Manejo fincas	Seguridad y salud	Economía	Movilidad	Riesgo agropecuario
Construcciones inteligentes	Mantenimiento	Video vigilancia	E-turismo	Movilidad inteligente	Conocimiento del riesgo
Smart grid	Datos abiertos	Telemedicina	E-busines	Vehículos autónomos	IoT
Smart water	E-goverment	Alertas tempranas	E-commerce	Transporte inteligente	Edge computing
Manejo desechos	E-learning	Manejo emergencias	Conexiones minoristas	Manejo fletes	Análisis de datos

Fuente: elaboración propia.

El servicio de manejo de fincas corresponde a toda la administración de la infraestructura, el proceso logístico y el de producción que en ella se realiza. Desde la digitalización de los procesos y los sistemas de monitoreo a infraestructura, maquinaria y cultivos se pueden realizar los planes de mantenimiento, con la opción de tener datos en tiempo real para conocer y mitigar los riesgos con franjas pequeñas de tiempo.

En una comunidad agropecuaria inteligente los datos abiertos son de interés en la medida que sean calificados como tal; estos datos pueden ser de las estaciones de monitoreo ambiental y ser usados por diferentes comunidades.

Hablar de comunidades agropecuarias en ciertos casos requerirá de alianzas, del trabajo colaborativo entre diferentes agentes y de la intermediación del Estado, por tal motivo, el *e-goverment* permite el manejo organizacional y establecer un gobierno de información siempre en pro del fortalecimiento de las comunidades.

Otro elemento fundamental es el *e-learning*, que sirve para fortalecer los procesos de apropiación social del conocimiento; prácticamente todo proyecto debe contener un componente de formación para garantizar mayor capacidad en el territorio, ya que es a partir del conocimiento situado que se generan los procesos de innovación en la solución de problemas locales.

Entretanto, las comunidades para agricultura inteligente deben partir de unos principios desde donde se desarrolla toda la arquitectura. Esto es

fundamental, porque no es solamente construir una finca inteligente, se trata de avanzar hacia comunidades inteligentes, por tanto, los principios deben trazarse a varios proyectos. De no ser así, las soluciones tendrán una taxonomía y lenguajes diferentes, lo que podría ocasionar problemas de interoperabilidad.

Un aporte de las comunidades para agricultura inteligente es aterrizar la seguridad y la salud. La primera, en términos de protección de los bienes, pero también vista desde la protección del trabajador, en la que un agricultor promedio sobrepasa el número de horas legales de trabajo y está expuesto a riesgos que afectan su salud. Es desde allí que las redes 5G jugarán un papel fundamental para tener asistencia en el control y tratamiento.

Asimismo, desde la seguridad se perciben también los sistemas de alertas tempranas, en las que se protegen los cultivos de cambios ambientales drásticos y de enfermedades por su detección temprana.

Las comunidades para agricultura inteligente se benefician del comercio electrónico, pues permite mejorar los costos de producción maximizando el rendimiento y generando un mayor beneficio. También, facilitan otro tipo de modelos de negocio, como el turismo agropecuario y ambiental, lo cual forja mayor movilidad de los mercados locales.

Cabe destacar el servicio de la movilidad, que se representa en el desplazamiento de personas, insumos y productos, pero también en los procesos de cultivo, riego, mantenimiento y cosecha, por medio de vehículos autónomos de características ajustadas al territorio y al uso particular de la finca; los vehículos pueden ser terrestres, aéreos o acuáticos.

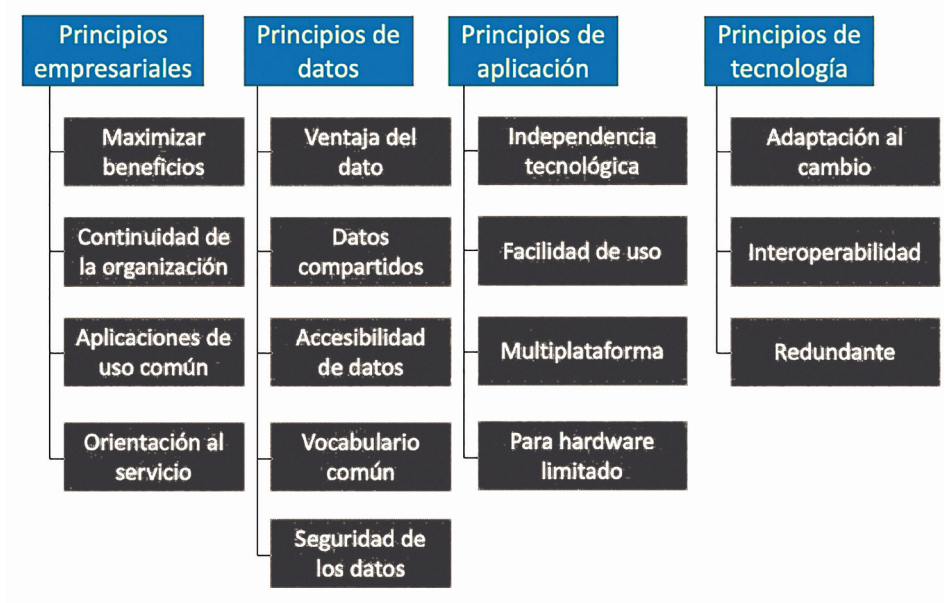
Finalmente, otro servicio planteado es el conocimiento del riesgo, el cual se nutre de los diferentes sistemas de monitoreo, como IoT y *Edge Computing*; es desde este último que el procesamiento se baja a los procesos.

Principios de una arquitectura para agricultura inteligente

Para construir comunidades para agricultura inteligente se debe comenzar por plantear los principios que rigen el diseño y la operación. En la Figura 68 se presentan cuatro principios: el primero de ellos, es el empresarial, que

busca dar una ventaja a la comunidad energética inteligente para que el negocio perdure; por tanto, estas comunidades deben interactuar con otras, y siempre buscar aplicaciones y vocabulario común para alinear las acciones hacia sus servicios.

Figura 68. Principios de la arquitectura que deben tener las comunidades para agricultura inteligente



Fuente: elaboración propia.

Otro de los principios son los datos. Bien sea para tomar decisiones rápidas o informadas, los datos pueden ser abiertos y compartidos con diferentes organizaciones, además, tener accesibilidad, un vocabulario común y ser seguros. En el principio de las aplicaciones se debe buscar la interoperabilidad de plataformas y equipos, por lo que el último principio de tecnología busca que con el tiempo se pueda adaptar a los cambios, que sea redundante y que, en caso de falla, siga funcionando.

Arquitectura lógica

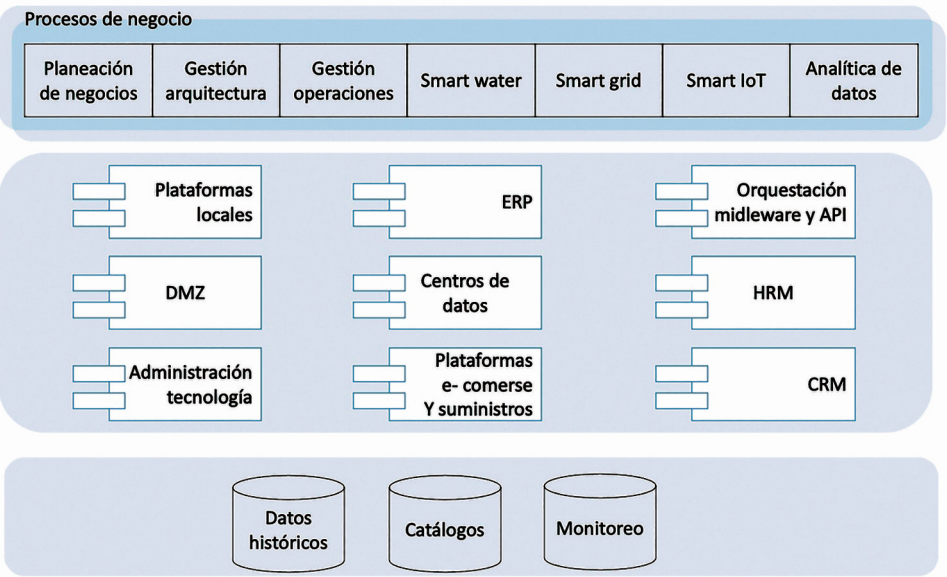
Es necesario que el desarrollo tecnológico esté alineado al proceso para que realmente responda a la misionalidad, por tal motivo, se deben plantear los procesos de negocio. En la Figura 69 se observan los procesos de planeación

de negocios, gestión de arquitectura, gestión de operaciones agropecuarias, manejo del agua, manejo de la energía, sistemas de monitoreo, automatización y analítica de datos.

En la arquitectura lógica se observan todas las plataformas locales de operación, que pueden ser sistemas automatizados, redes IoT, sistemas de control de riego, redes de monitoreo en los procesos de los cultivos y de la logística de una finca.

Se tienen, además, zonas de seguridad debido a la importancia del trabajo en ciberseguridad para asegurar los procesos, así como la administración del sistema, los centros de datos si se requieren o son administrados en la nube, y todo el relacionamiento que desde las aplicaciones se debe facilitar para el contacto con los usuarios.

Figura 69. Arquitectura lógica



Fuente: elaboración propia.

Etapas de implementación de arquitectura para agricultura inteligente

De acuerdo con lo tratado anteriormente, y a los diferentes capítulos vistos en este libro de investigación, se integran los diferentes aspectos de una ruta metodológica que permita desarrollar agricultura inteligente en Colombia. Dicha ruta comprende las etapas señaladas a continuación.

Implementación

La agricultura inteligente en Colombia se ha concebido como un enfoque estratégico y organizado para implementar tecnologías de vanguardia en el sector agrícola. Enfrentando los desafíos actuales y anticipándonos a las necesidades futuras, en este libro se estructura el proyecto en etapas progresivas y coherentes. Cada fase ha sido cuidadosamente diseñada para aprovechar al máximo las capacidades de IPv6, IoT, robótica, inteligencia artificial, drones, sistemas embebidos y muchas otras tecnologías punteras.

A través de una combinación sinérgica de estas herramientas, se busca optimizar la eficiencia, reducir la huella ambiental y mejorar la productividad agrícola en todo el país. Para ello, se hace una implementación por etapas, donde cada paso representa un impulso significativo hacia una agricultura inteligente, sostenible y económicamente viable para el beneficio de toda la comunidad agrícola colombiana.

Etapa 1. Investigación y planificación inicial

- a. Realizar un análisis del sector agrícola en Colombia para identificar las principales necesidades y desafíos que enfrenta.
- b. Establecer un equipo interdisciplinario que incluya expertos en tecnología, agronomía, economía y otros campos relevantes.
- c. Definir objetivos claros para la implementación de tecnologías en el sector agrícola y establecer indicadores clave de rendimiento (KPI) para medir el éxito del proyecto.
- d. Identificar las áreas geográficas piloto donde se implementará la tecnología agro inteligente.

Etapas 2. Infraestructura tecnológica

- a. Implementar el protocolo IPv6 en toda la infraestructura de comunicación para asegurar la disponibilidad de direcciones IP y la conexión de todos los dispositivos y sistemas.
- b. Desarrollar y desplegar una red de sensores IoT que recopile datos sobre el clima, la humedad del suelo, la calidad del aire y otros factores relevantes para la agricultura.
- c. Establecer una plataforma de *Cloud Computing* para almacenar, procesar y analizar los grandes volúmenes de datos generados por los sensores y otros dispositivos.

Etapas 3. Integración de tecnologías

- a. Implementar sistemas embebidos y electrónicos en maquinarias agrícolas y equipos para habilitar la automatización y la robotización en el proceso de cultivo.
- b. Desarrollar algoritmos de irrigación inteligente que utilicen datos recopilados por los sensores para optimizar el uso del agua en la agricultura.
- c. Introducir drones equipados con sensores para supervisar y mapear los cultivos, con la identificación de áreas problemáticas y la aplicación de tratamientos específicos.

Etapas 4. Inteligencia artificial y análisis de datos

- a. Implementar técnicas de inteligencia artificial para analizar los datos agrícolas recopilados y generar información y recomendaciones precisas para los agricultores.
- b. Desarrollar modelos de aprendizaje automático que ayuden a predecir cosechas, estimar rendimientos y prevenir enfermedades o plagas.
- c. Integrar la analítica de datos para proporcionar información detallada sobre la eficiencia de los procesos y optimizar la toma de decisiones.

Etapa 5. Aspectos económicos y académicos

- a. Evaluar los costos de implementación y operación de la tecnología de agricultura inteligente en comparación con los métodos tradicionales de agricultura.
- b. Establecer incentivos y apoyos gubernamentales para alentar la adopción de estas tecnologías por parte de los agricultores.
- c. Fomentar programas de formación y capacitación para que los agricultores y profesionales del sector puedan comprender y utilizar eficazmente las tecnologías implementadas.

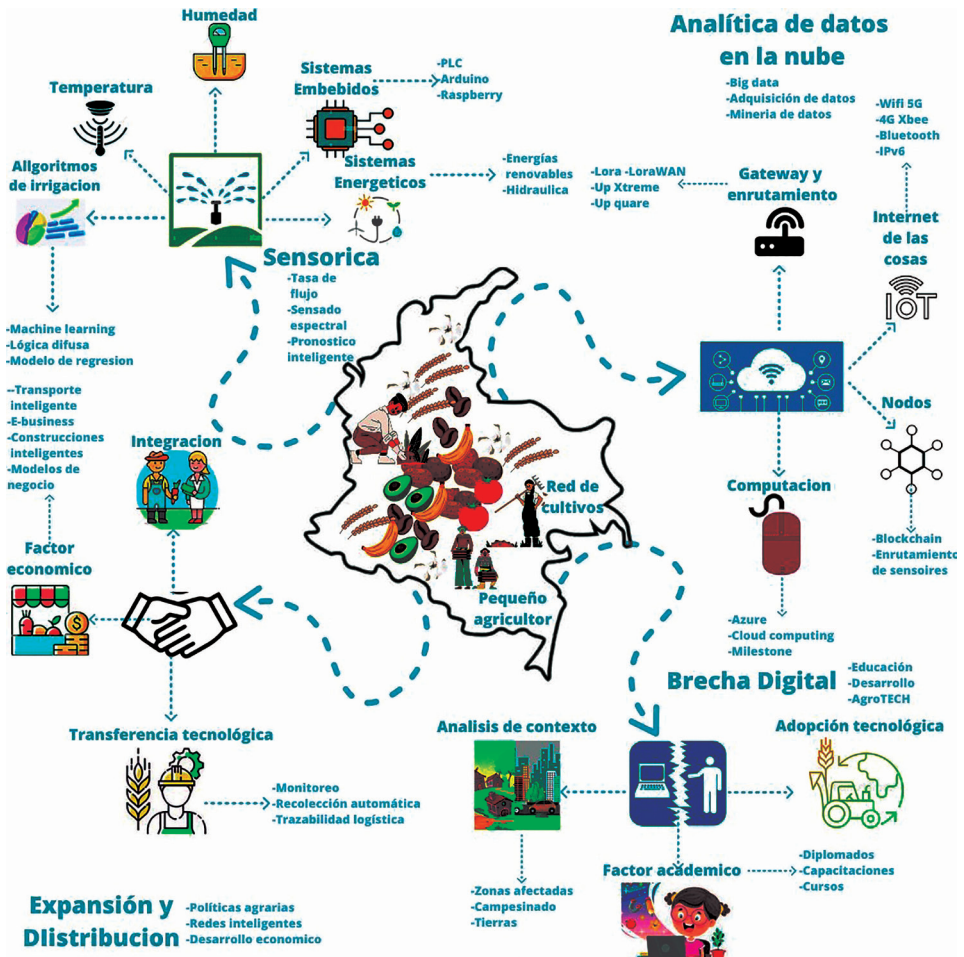
Etapa 6. Escalado y expansión

- a. Evaluar los resultados obtenidos en las áreas piloto y realizar ajustes y mejoras según sea necesario.
- b. Extender gradualmente la implementación de la tecnología agro inteligente a otras regiones de Colombia.
- c. Fomentar la colaboración entre el sector privado, el sector público y las instituciones académicas para seguir impulsando la investigación y el desarrollo en el ámbito de agro inteligencia.

La agricultura inteligente en Colombia permite trazar un camino claro hacia una agricultura más avanzada y resiliente. Cada fase del proyecto ha sido cuidadosamente estructurada para integrar la mayoría de las tecnologías innovadoras. A través de esta combinación sinérgica, se busca enfrentar los desafíos agrícolas con soluciones inteligentes y sostenibles, lo que aumenta la productividad, optimiza el uso de recursos, reduce costos y protege el medioambiente.

Con el compromiso de colaboración entre el sector público, privado y académico, se espera que la implementación de agro inteligente traiga beneficios significativos para los agricultores, la economía y el país en su conjunto. El futuro de la agricultura en Colombia es prometedor; esperamos que este libro sirva como ejemplo inspirador para la adopción de tecnologías innovadoras en otras áreas cruciales de nuestro desarrollo nacional.

Figura 70. Propuesta para la inclusión de IoT y tecnología de punta en agricultura inteligente en Colombia



Fuente: elaboración propia.

Capítulo 10. Resultados del proyecto de investigación

De acuerdo con lo planteado en los capítulos anteriores, a continuación, se presentan los resultados del proyecto de investigación desarrollado por el grupo LIDER de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En primer lugar, se hace un análisis de la encuesta aplicada a diferentes actores que tienen una opinión importante sobre el desarrollo de la agricultura inteligente en Colombia. El diseño metodológico del trabajo se dividió en una metodología general, la cual consistió en la caracterización de la opinión de diferentes profesionales en diversas áreas sobre diez preguntas relacionadas con la agricultura inteligente.

El desarrollo de una encuesta para una investigación es una práctica común para recopilar datos de manera sistemática y objetiva; permite evaluar las opiniones y percepciones de diferentes profesionales que intervienen en el tema de investigación. Esta es una herramienta útil para obtener información cuantitativa o cualitativa.

Los pasos que se realizaron en la presente investigación fueron:

- Definición del objetivo de la investigación relacionado con la agricultura inteligente en Colombia y cómo se puede desarrollar por medio de la innovación y la investigación desde diferentes puntos de vista, como la

academia, la empresa y el Estado. De esta manera, se evidencia que la agricultura inteligente en nuestro país está en un nivel mínimo y debe ser desarrollada por diferentes actores.

- La población objetivo son ingenieros eléctricos, electrónicos informáticos e industriales; administradores de empresas, abogados, docentes, investigadores y estudiantes. El cuestionario se envió a más de 100 personas.
- El diseño del cuestionario: se realizaron diez preguntas clave con respuesta cerrada, con el fin de cuantificar las opiniones.
- El cuestionario fue validado por varios expertos en el tema a nivel nacional e internacional.
- Se realizó la recopilación de los datos con ayuda de *Google Forms*.
- Se hizo un análisis cualitativo de las respuestas abiertas o métodos de análisis más complejos, según el tipo de datos recopilados.
- Por último, se interpretaron los resultados y se puso de manifiesto la opinión de los encuestados acerca de la agricultura inteligente en Colombia.

Preguntas realizadas

A continuación, se presentan las diez preguntas seleccionadas por los expertos que recomendaron su realización. Se seleccionaron de un banco de 25 preguntas y se escogieron las más representativas, las cuales fueron enviadas a estudiantes, docentes, investigadores y profesionales de diferentes ramas del conocimiento.

Investigación sobre la agricultura rural y su industrialización en Colombia

1. **¿Desde su experiencia, considera que Colombia tiene una agricultura industrializada?**
 - a. La agricultura en Colombia no está industrializada.
 - b. La agricultura en Colombia sí está industrializada.

2. **¿Considera que la agricultura rural en Colombia debe ser desarrollada teniendo en cuenta la investigación, la innovación y el Internet de las Cosas?**
 - a. Sí, estoy de acuerdo.
 - b. Estoy de acuerdo medianamente.
 - c. Considero que el desarrollo rural debe ser realizado por países como Estados Unidos o grandes potencias.
 - d. Considero que Colombia no está preparada tecnológicamente para el desarrollo rural.
3. **¿Conoce si Colombia tiene políticas rurales para el desarrollo agrícola?**
 - a. En Colombia no hay políticas de desarrollo rural.
 - b. Sí, Colombia tiene políticas de desarrollo rural que permiten a los pequeños y grandes productores llevar sus productos y tener gran rentabilidad.
4. **El uso de tecnología de punta, de acceso a redes e Internet de las Cosas permite que:**
 - a. El sector agrícola mejore su producción e incremente la exportación de los productos a nivel internacional.
 - b. Considero que es mejor que el sector agrícola continúe sin el uso de la tecnología.
 - c. Considero que es mejor desarrollar el turismo y no la agricultura en nuestro país.
 - d. Es mejor importar todos los productos agrícolas que consume nuestro país.
5. **¿Sabe usted qué son las redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) y en qué tipo de proyectos pueden aplicarse?**
 - a. Sí.
 - b. No.

6. **¿Considera que la utilización de redes LPWAN e Internet de las Cosas en los sectores rurales colombianos puede aportar al aumento de la productividad y la mejora en los cultivos?**
 - a. Sí, puede aportar.
 - b. No, no pueden aplicarse en sectores rurales.
7. **¿Cuál de las siguientes tecnologías de redes LPWAN conoce usted?**
 - a. Sigfox.
 - b. LoRa/LoRaWAN.
 - c. NB-IoT.
 - d. Todas la anteriores.
 - e. Ninguna de las anteriores.
8. **¿Qué impacto ha observado en su experiencia personal o conocimiento sobre el uso de tecnología en la agricultura en términos de reducción de costos y maximización de rendimientos?**
 - a. A futuro permite reducir costos.
 - b. Los costos seguirán siendo iguales.
 - c. El retorno de la inversión es a muy largo plazo.
9. **¿Cree que la tecnología en la agricultura inteligente puede contribuir a la conservación de recursos naturales, como el agua y el suelo, y a la mitigación del cambio climático?**
 - a. Sí, considero que permite conservar los recursos naturales.
 - b. No considero que permita conservar los recursos naturales.
 - c. Es mejor seguir labrando manualmente el agro.
 - d. La agricultura inteligente genera más impactos negativos al planeta.

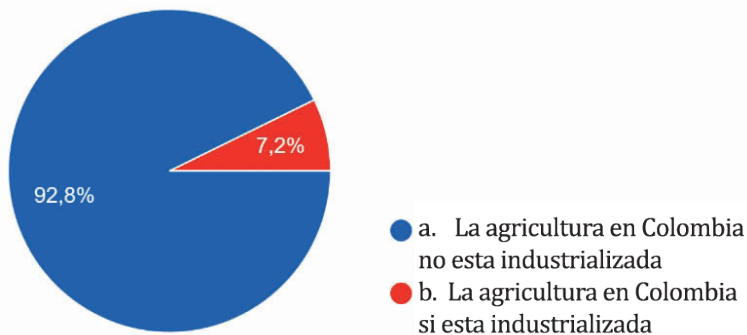
10. ¿La incorporación de tecnologías, como la inteligencia artificial, la automatización y el monitoreo remoto en la agricultura permite mejorar la toma de decisiones y la gestión de cultivos?

- a. Considero que es importante para tomar decisiones sobre qué cultivar.
- b. No creo que la tecnología sirva para tomar decisiones.
- c. Una vez enviado el cuestionario, se obtuvieron 69 respuestas, las cuales se analizan en el siguiente apartado.

Análisis de las respuestas

A continuación, se presenta el análisis de cada una de las diez respuestas obtenidas en la presente investigación.

Figura 71. Gráfica de resultados pregunta 1 de la encuesta



Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- Un porcentaje mayor al 90 % de los encuestados respondió que la agricultura no está industrializada.
- Un mínimo de 7,2 % de la población cree que la agricultura colombiana tiene una posición industrializada.

Figura 72. Gráfica de resultados pregunta 2 de la encuesta

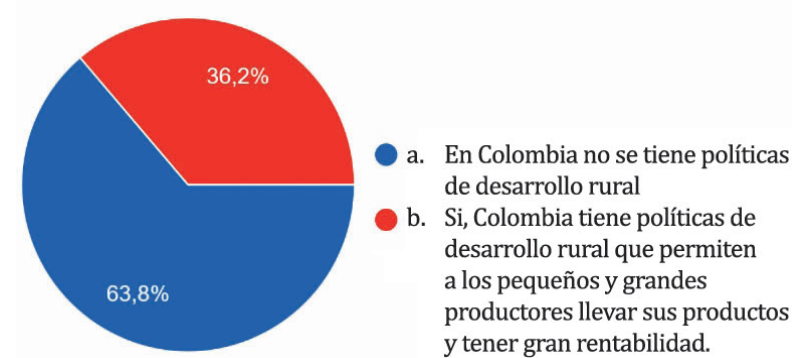


Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- Más de la mitad de la población está de acuerdo en que es necesario que la agricultura colombiana llegue a tener un desarrollo tecnológico apropiado.
- Otros tienen dudas ante la respuesta de la pregunta y se inclinan a contestar que sí.
- Por último, una parte pequeña considera que Colombia no tiene las bases para una obtención de desarrollo tecnológico y que muchas cosas tecnológicas son importadas.

Figura 73. Gráfica de resultados pregunta 3 de la encuesta



Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- Con un porcentaje mayor al 50 %, los encuestados indican que Colombia no cuenta con políticas de desarrollo rural.
- Cierta parte de la población está segura de que en Colombia deben existir reglas políticas de desarrollo rural.

Figura 74. Gráfica de resultados pregunta 4 de la encuesta

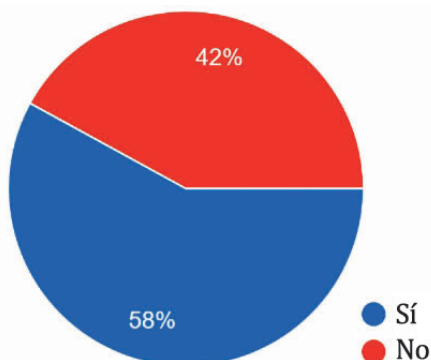


Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- Toda la población encuestada indica que el sector agrícola debe mejorar mediante el uso de tecnología de punta e IoT.

Figura 75. Gráfica de resultados pregunta 5 de la encuesta

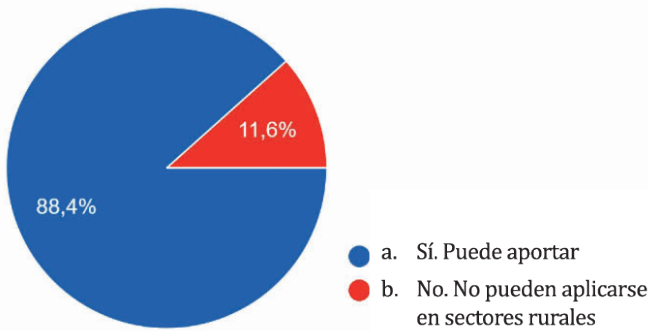


Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- El 58 % de los encuestados conoce y entiende sobre las redes LPWAN.
- El 42 % indica desconocimiento de este tipo de tecnología, por tanto, es importante dar a conocer estos avances para que más personas las utilicen.

Figura 76. Gráfica de resultados pregunta 6 de la encuesta



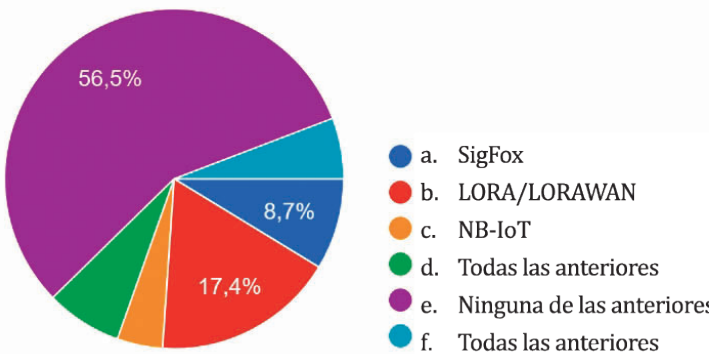
Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

El 88,4 % de las personas indica que las redes LPWAN, al ser usadas en el entorno rural colombiano, permitirán su automatización.

Con un porcentaje mínimo, pocos encuestados señalan que no habría aumento ni mejora en los cultivos.

Figura 77. Gráfica de resultados pregunta 7 de la encuesta

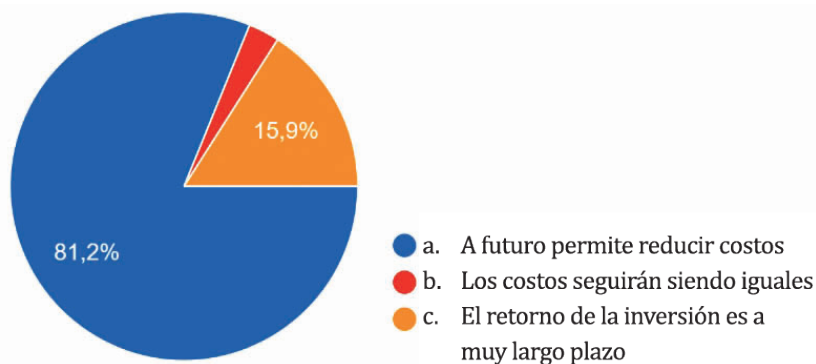


Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- El 56,5 % de las personas encuestadas desconocen diferentes tecnologías asociadas con IoT y que pueden ser implementadas en agricultura inteligente.
- Es importante destacar que algunos expertos e investigadores conocen la tecnología LoRa/WAN y Sigfox, empresas importantes que realizan desarrollos de IoT.
- Es importante realizar paneles de expertos y seminarios para actualizar a las personas que no conocen este tipo de fabricantes.

Figura 78. Gráfica de resultados pregunta 8 de la encuesta



Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- El 81,2 % de los encuestados cree que el uso de tecnología de punta en la agricultura llegaría a reducir los costos en la producción y maximizaría su rendimiento.
- El 15,9 % de los encuestados cree que la implementación de la tecnología es costosa a largo plazo; esto quiere decir que es importante que el sector gobierno, dentro de sus políticas agrícolas de desarrollo, incluya el apoyo monetario a los agricultores del país.

Figura 79. Gráfica de resultados pregunta 9 de la encuesta

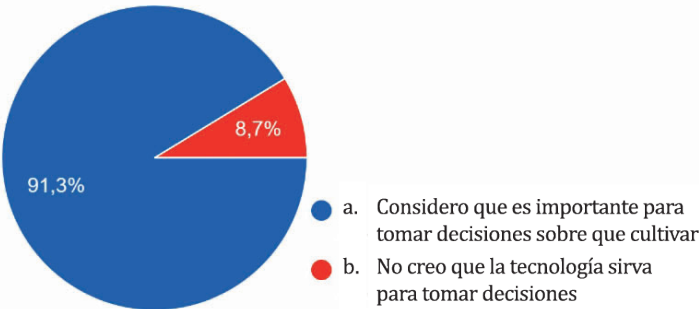


Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- El 88,4 % de los encuestados cree que en algún caso la agricultura inteligente contribuye en buena medida a colaborar en la conservación de los recursos naturales; esto se debe a que se usa de forma adecuada el agua de los riegos, no se contamina al retornar al medioambiente y se emplea de forma eficiente la energía en los cultivos, además, se genera menos CO2 en el ambiente.
- El 5,8 % de los encuestados toma la posición de que, o la inteligencia no sería de mayor utilidad en la conservación de los alimentos, o la tecnología como la agricultura inteligente, en vez de ayudar y facilitar el trabajo podría generar un impacto negativo. Así puede ser interpretado por aquellas personas que no conocen los desarrollos tecnológicos de punta que pueden ser aplicados al sector del agro.

Figura 80. Gráfica de resultados pregunta 10 de la encuesta



Fuente: elaboración propia.

Inferencia:

- El 91,3 % de los encuestados cree que es importante la inteligencia artificial y la automatización de los cultivos para la toma decisiones por parte de los agricultores en la gestión eficiente y efectiva en los cultivos. En gran medida esto es afirmativo porque los agricultores pueden tener sistemas que optimicen el uso de los recursos de forma efectiva y eficiente.
- Solo el 8,7 % de los encuestados no cree que la inteligencia artificial sea importante para la automatización de los cultivos y la toma decisiones.

Resultados de la investigación

Industrializar la agricultura mediante el uso de IoT, tecnología de punta y técnicas de inteligencia artificial es un proceso que implica la incorporación de estas tecnologías y prácticas más avanzadas en la producción agrícola teniendo en cuenta el objetivo de aumentar la eficiencia, productividad y sostenibilidad del sector.

Esta transformación es fundamental para enfrentar los desafíos globales actuales y futuros en la producción de alimentos. Algunas de las razones por las que es importante industrializar la agricultura son:

- Aumento de la productividad: la industrialización agrícola permite el uso de tecnologías avanzadas, como maquinaria especializada, robótica, sistemas de riego eficientes, semillas mejoradas y fertilizantes precisos. Esto lleva a un aumento significativo en la productividad y la cantidad de alimentos producidos por unidad de área cultivada.
- Mejora de la seguridad alimentaria: la industrialización agrícola puede ayudar a satisfacer la creciente demanda de alimentos debido al aumento de la población mundial. Al aumentar la producción, se pueden proporcionar más alimentos a nivel local y global, lo que garantiza la seguridad alimentaria.
- Reducción del desperdicio de alimentos: al mejorar las prácticas agrícolas y aumentar la eficiencia en la producción, se puede reducir el desperdicio de alimentos en todas las etapas de la cadena de suministro, desde la producción hasta el consumo.

- **Uso más eficiente de recursos:** la industrialización agrícola incluye prácticas de agricultura de precisión, lo que permite un uso más eficiente de recursos, como el agua, los fertilizantes y los pesticidas. Esto ayuda a reducir el impacto ambiental y promueve la sostenibilidad en la producción de alimentos; así disminuye la contaminación de ríos, océanos y el medioambiente.
- **Diversificación económica:** la industrialización agrícola implica el desarrollo de la agroindustria, lo que puede diversificar la economía de un país y generar empleo en sectores relacionados, como en el procesamiento de alimentos, la logística y la comercialización.
- **Incorporación de innovación y tecnología:** la industrialización agrícola promueve la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas agrícolas por parte de universidades y centros de investigación. Esto puede llevar a la adopción de tecnologías más avanzadas y sostenibles, como la agricultura de precisión, la biotecnología y la automatización.
- **Incremento de los ingresos rurales:** la mejora en la productividad agrícola puede aumentar los ingresos de los agricultores y las comunidades rurales; asimismo, disminuye la pobreza, mejora las condiciones sociales de los más necesitados y contribuye al desarrollo económico y a la reducción de la pobreza extrema en estas áreas.
- **Adaptación al cambio climático:** la industrialización agrícola puede ayudar a enfrentar los desafíos del cambio climático al permitir prácticas agrícolas más resilientes y sostenibles, como sistemas de riego inteligentes y cultivos más resistentes a condiciones climáticas extremas.

En resumen, industrializar la agricultura es esencial para garantizar la seguridad alimentaria, promover la sostenibilidad, mejorar la eficiencia y adaptarse a los desafíos cambiantes en el ámbito agrícola. Esto beneficia tanto a los agricultores como a la sociedad en su conjunto al aumentar la producción de alimentos de manera sostenible y mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales.

Funcionamiento de Sigfox

Sigfox es una tecnología de red de comunicación diseñada específicamente para el IoT. Se trata de una red de baja potencia y bajo costo que permite conectar dispositivos y sensores de forma eficiente y segura, con el objetivo de enviar pequeñas cantidades de datos en largas distancias. Las principales características de la tecnología Sigfox son:

- **Red de bajo consumo:** Sigfox utiliza tecnología de bajo consumo de energía, lo que permite que los dispositivos IoT funcionen durante periodos prolongados sin necesidad de cambiar o recargar baterías con frecuencia. Esto es especialmente valioso en aplicaciones que requieren una larga vida útil de las baterías, como sensores de monitoreo remoto que pueden ser implementadas en la agricultura inteligente.
- **Bajo ancho de banda:** la tecnología Sigfox está diseñada para transmitir pequeñas cantidades de datos, como mensajes cortos y comandos sencillos. Esto hace que sea adecuada para aplicaciones que no necesitan gran cantidad de datos, como la medición de niveles, el seguimiento de ubicación o el monitoreo de condiciones ambientales.
- **Cobertura amplia:** una de las ventajas de Sigfox es su capacidad para proporcionar cobertura en áreas extensas; esta herramienta utiliza menos estaciones base que otras tecnologías de red celular. Esto permite que los dispositivos IoT se comuniquen en entornos rurales o remotos, lo que es especialmente útil para aplicaciones agrícolas y de seguimiento de activos.
- **Bajo costo:** debido a su baja complejidad y el uso eficiente de recursos, Sigfox es una opción rentable para implementar soluciones IoT a gran escala. Esto facilita la adopción de la tecnología en diversas industrias.
- **Seguridad:** Sigfox utiliza mecanismos de cifrado y autenticación para garantizar la seguridad de la comunicación entre los dispositivos conectados y la plataforma de la red.

Dentro de los usos típicos de la tecnología Sigfox se pueden enlistar los siguientes:

- **Monitoreo de recursos naturales:** se utiliza para monitorear niveles de agua, calidad del aire, condiciones climáticas, niveles de ríos y otras variables ambientales.
- **Agricultura:** ayuda a supervisar cultivos, controlar el riego, monitorear el ganado y optimizar la producción agrícola.
- **Gestión de activos:** permite rastrear la ubicación y el estado de activos, como contenedores, vehículos y maquinaria industrial.
- **Seguridad y alarmas:** se emplea en sistemas de seguridad y alarmas para notificar eventos y situaciones anómalas.

Es importante tener en cuenta que, aunque Sigfox es una tecnología con muchas ventajas, también tiene limitaciones, especialmente debido a su baja velocidad de transmisión y capacidad de datos. Por tanto, la elección de la tecnología más adecuada para una aplicación específica dependerá de los requisitos y las necesidades particulares de cada caso en particular con la agricultura inteligente.

Puede ser usada, también, para transmitir información de sensores y actuadores desde los cultivos que se requiere monitorear, esto sería el equivalente a una red LAN en cuanto al acceso de tipo WAN, que puede ser realizado a futuro con tecnología 5G.

Funcionamiento de LoRaWAN

LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo de energía, diseñada específicamente para aplicaciones del IoT. Es una red de área amplia (LPWAN) que permite conectar dispositivos de IoT de forma eficiente, económica y segura, especialmente en áreas rurales o de difícil acceso. A continuación, se explica cómo funciona esta tecnología y dónde se puede aplicar:

- **Topología de red:** LoRaWAN utiliza una topología de red en estrella invertida, donde múltiples dispositivos de IoT (nodos) se comunican con una estación base central (*gateway*) a través de señales de radio de largo alcance.

- **Modulación LoRa:** la tecnología LoRa (*Long Range*) permite las comunicaciones de largo alcance y bajo consumo de energía. Utiliza una técnica de modulación de espectro ensanchado, que permite transmitir datos a larga distancia con alta inmunidad al ruido y baja tasa de errores.
- **Frecuencias y bandas:** LoRaWAN opera en diferentes frecuencias, lo que puede variar según la región. En Europa, usa las bandas de frecuencia ISM (868 MHz); mientras que en América utiliza las bandas ISM (915 MHz). Al emplear frecuencias no licenciadas, su implementación es más sencilla y económica.
- **Comunicación bidireccional:** los nodos de IoT pueden enviar datos a la estación base (*uplink*) y recibir comandos o datos de la estación base (*downlink*). Esta comunicación bidireccional permite mayor flexibilidad en las aplicaciones.

La tecnología LoRaWAN es adecuada para aplicaciones que requieren comunicación de largo alcance, bajo consumo de energía y una amplia cobertura en áreas extensas. Algunos ejemplos de dónde se puede aplicar esta tecnología incluyen:

- **Smart Cities:** LoRaWAN se puede utilizar para implementar soluciones de monitoreo remoto de infraestructuras urbanas, como sensores de estacionamiento, medidores de agua y sensores de calidad del aire.
- **Agricultura inteligente:** permite el monitoreo y la gestión de cultivos, control de riego, detección de incendios forestales y seguimiento del ganado en áreas rurales.
- **Logística y seguimiento de activos:** LoRaWAN se utiliza para rastrear la ubicación y el estado de activos, como contenedores, vehículos y equipos industriales.
- **Medioambiente:** ayuda en la recopilación de datos ambientales, como monitoreo de niveles de agua, calidad del aire, y detección de incendios y movimientos sísmicos.
- **Redes de sensores industriales:** se aplica en la industria para el monitoreo de condiciones en plantas de producción, procesos de fabricación y control de inventarios.

- Seguridad y alarmas: utilizado en sistemas de seguridad y alarmas para notificar eventos y situaciones anómalas.

La tecnología LoRaWAN ha ganado popularidad debido a su flexibilidad y bajo costo de implementación, lo que ha llevado a un crecimiento significativo en su adopción en diversas industrias y aplicaciones de IoT en todo el mundo.

Resultados de la investigación sobre incorporación de IoT en agricultura inteligente

Incorporar el uso de tecnologías como Sigfox y LoRaWAN en una política de desarrollo agrícola en un país como Colombia puede ser un paso importante para mejorar la productividad, la sostenibilidad y la eficiencia en el sector agrícola. A continuación, se presentan algunas formas en que se puede aplicar estas tecnologías dentro de una política de desarrollo agrícola:

- Fomentar la adopción de IoT en la agricultura: la política puede promover activamente la adopción de tecnologías IoT, como Sigfox, LoRaWAN u otras; además, proporciona incentivos y apoyo financiero a los agricultores y empresas agrícolas que deseen implementar soluciones basadas en estas tecnologías.
- Creación de infraestructura de red: la política de desarrollo agrícola podría incluir la expansión y mejora de la infraestructura de red necesaria para la implementación de Sigfox y LoRaWAN en áreas rurales y remotas. Esto implica la instalación de estaciones base y la promoción de acuerdos de colaboración entre el sector público y privado.
- Capacitación y formación: se puede ofrecer capacitación y formación a agricultores y técnicos agrícolas sobre la utilización y el aprovechamiento al máximo de las tecnologías IoT en sus actividades agrícolas. Esto incluiría enseñar a los agricultores a instalar y mantener los dispositivos IoT, así como a interpretar los datos recopilados.
- Apoyo a la investigación y desarrollo: la política podría destinar recursos a la investigación y el desarrollo de soluciones IoT específicas para el contexto agrícola del país. Esto incluye el desarrollo de sensores especializados, sistemas de monitoreo y *software* de análisis de datos adaptados a las necesidades agrícolas locales.

- **Colaboración público-privada:** promover la colaboración entre el gobierno, empresas privadas y organizaciones de investigación puede acelerar la implementación de tecnologías IoT en la agricultura. El Estado podría ofrecer incentivos para que las empresas inviertan en proyectos de IoT agrícolas y apoyar así la creación de alianzas estratégicas.
- **Financiamiento accesible:** facilitar el acceso a financiamiento para que los agricultores puedan invertir en tecnologías IoT agrícolas y así mejorar sus prácticas de cultivo y gestión de recursos.
- **Monitoreo y evaluación:** es importante establecer mecanismos para monitorear y evaluar el impacto de la implementación de tecnologías IoT en la agricultura. Esto permitirá ajustar las políticas según los resultados obtenidos y mejorar continuamente la eficacia de las soluciones implementadas.

La incorporación de tecnologías IoT, como Sigfox y LoRaWAN, en una política de desarrollo agrícola en el país impulsará la modernización del sector agrícola y mejorará la vida de los agricultores con el aumento de la productividad y la sostenibilidad de sus prácticas agrícolas. Además, estas tecnologías también pueden contribuir a la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y la reducción de la pobreza en las áreas rurales.

Conclusiones

La agricultura inteligente basada en IoT y sensores conectados a internet es una tendencia emergente que busca utilizar tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y productividad en el sector agrícola. Esta aproximación puede proporcionar diversas ventajas, pero también conlleva algunos desafíos y dificultades. A continuación, se detallan algunos de los aspectos positivos y negativos de esta tecnología.

Ventajas de la agricultura inteligente basada en IoT y sensores conectados

- **Monitoreo y control en tiempo real:** los sensores permiten a los agricultores recopilar datos sobre factores como la humedad del suelo, la temperatura, el nivel de nutrientes, entre otros, en tiempo real. Esto posibilita tomar decisiones informadas y ajustar las prácticas agrícolas de manera más efectiva.
- **Optimización de recursos:** al obtener datos precisos sobre las condiciones del cultivo y el entorno, los agricultores pueden optimizar el uso de agua, fertilizantes y pesticidas, lo que reduce el desperdicio y el impacto ambiental.

- **Automatización y eficiencia:** la automatización de ciertas tareas agrícolas, como el riego, la fertilización y la recolección, puede aumentar la eficiencia y reducir la carga de trabajo manual.
- **Predicción y prevención de plagas y enfermedades:** los sensores y la recopilación de datos históricos puede ayudar a predecir brotes de plagas o enfermedades, lo que permite tomar medidas preventivas para evitar pérdidas en la producción.
- **Acceso a información y análisis avanzados:** las tecnologías IoT brindan acceso a plataformas y herramientas de análisis avanzadas, lo que facilita la toma de decisiones basadas en datos y mejora la planificación agrícola.

Desventajas y desafíos

- **Costos iniciales:** la implementación de la agricultura inteligente basada en IoT y sensores requiere una inversión significativa en tecnología, equipos y capacitación, lo que puede ser un obstáculo para pequeños agricultores.
- **Conectividad y acceso a internet:** en algunas zonas rurales, la falta de infraestructura de conectividad puede dificultar la implementación efectiva de estas tecnologías.
- **Ciberseguridad y privacidad:** la conexión a internet de dispositivos agrícolas también puede exponerlos a posibles amenazas de ciberseguridad. Además, la recopilación y el manejo de datos agrícolas requiere medidas para proteger la privacidad de los agricultores.
- **Dependencia tecnológica:** la tecnología puede ser susceptible a fallas o interrupciones, lo que puede afectar la productividad si los agricultores dependen en exceso de ella.
- **Curva de aprendizaje:** para muchos agricultores, adoptar y adaptarse a estas nuevas tecnologías puede llevar tiempo y requerir capacitación adicional.

En cuanto al uso de drones, estos se han convertido en una herramienta valiosa en la agricultura inteligente debido a su capacidad para recopilar

datos aéreos de manera rápida y precisa. Estos datos pueden utilizarse para tomar decisiones informadas y optimizar diversas actividades agrícolas. Las aplicaciones más destacadas son:

- **Monitoreo de cultivos:** los drones equipados con cámaras y sensores pueden sobrevolar los campos para capturar imágenes de alta resolución que permiten a los agricultores monitorear la salud de los cultivos. Esto incluye detectar signos de enfermedades, estrés hídrico, nutrientes deficientes o malezas, lo que facilita la identificación temprana de problemas y acciones correctivas.
- **Mapeo y análisis de terrenos:** los drones pueden realizar levantamientos topográficos y crear mapas de elevación de los campos agrícolas. Esto ayuda a identificar áreas con desniveles, pendientes, y mejorar la planificación del uso de la tierra y el riego.
- **Riego de precisión:** al utilizar drones con sensores infrarrojos y cámaras térmicas, los agricultores pueden evaluar la distribución del riego y ajustar la cantidad y la ubicación de agua según las necesidades específicas de cada área del cultivo.
- **Pulverización de cultivos:** algunos drones están equipados con sistemas de pulverización, lo que permite una aplicación más precisa y eficiente de fertilizantes y pesticidas. Esto reduce el desperdicio de insumos y la exposición innecesaria de los agricultores a productos químicos.
- **Conteo de cultivos:** los drones también pueden utilizarse para contar plantas en un campo, lo que facilita la estimación de la población de cultivos y el seguimiento del crecimiento.

En cuanto a algunas experiencias exitosas sobre agricultura inteligente en países como Estados Unidos, China, Canadá, Brasil, Chile y Perú, se destacan las siguientes compañías que desarrollan diferentes productos y aplicaciones:

- **John Deere:** una empresa estadounidense especializada en maquinaria agrícola que ha estado trabajando en soluciones de agricultura de precisión y tecnologías IoT para mejorar la eficiencia en el campo.

- Trimble: esta empresa, con sede en Estados Unidos, ofrece una amplia gama de soluciones de agricultura de precisión que incluyen sensores, *software* y sistemas de posicionamiento global (GPS).
- Monsanto (ahora, parte de Bayer): la compañía ha invertido en tecnologías agrícolas avanzadas, como sistemas de riego inteligente y soluciones de monitoreo de cultivos.
- Syngenta: una empresa líder en el campo de semillas y productos para la protección de cultivos, que también ha invertido en tecnologías agrícolas digitales y conectadas.
- AGCO Corporation: esta empresa, con sede en Estados Unidos, se enfoca en la fabricación de maquinaria agrícola; ha trabajado en soluciones de agricultura de precisión.
- Bosch: la empresa alemana ha desarrollado tecnologías IoT para aplicaciones agrícolas, en las que se incluyen sensores y sistemas de riego inteligente.
- Climate Corporation (parte de Bayer): es una empresa de tecnología agrícola que proporciona herramientas y servicios basados en datos para ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas.
- IBM: la compañía ha estado aplicando tecnologías de análisis de datos y aprendizaje automático en la agricultura para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad.
- BASF: otra empresa química y agroalimentaria que ha estado involucrada en el desarrollo de tecnologías agrícolas avanzadas, incluyendo sensores y soluciones digitales.
- SenseFly: una empresa suiza que se especializa en sistemas de drones agrícolas para el mapeo y la monitorización de cultivos.

En cuanto a los países donde se está desarrollando la agricultura inteligente basada en IoT y sensores, los que ocupan puestos destacados son Estados Unidos, Canadá, Alemania, China, Brasil, India, Australia, Israel, Japón y Países Bajos.

Entretanto, algunos ejemplos representativos de los productos que países latinoamericanos cultivan con la utilización de tecnologías de agricultura inteligente son:

- Brasil: cultivos de soja, maíz y caña de azúcar con sistemas de riego y monitoreo inteligente.
- Argentina: soja, maíz y trigo con uso de drones para mapeo y aplicación de fertilizantes y pesticidas.
- México: aguacates, frutos del bosque y tomates con tecnologías de riego y sensores para el monitoreo del suelo y las condiciones climáticas.
- Chile: uvas y manzanas con sistemas de riego inteligente y monitoreo de enfermedades.
- Colombia: cultivos de café con sistemas de riego eficientes y monitoreo de la calidad del suelo.
- Perú: espárragos y aguacates con tecnologías de riego y monitoreo del crecimiento de las plantas.
- Uruguay: soja y arroz con tecnologías de monitoreo y control de maquinaria agrícola.
- Paraguay: soja y maíz con tecnologías de riego y monitoreo del crecimiento de los cultivos.

En Colombia, varias empresas agrícolas y tecnológicas están involucradas en la implementación de sistemas de riego basados en sensores inteligentes. Algunas de estas son:

- Agrosmart: una empresa de tecnología agrícola que ha estado trabajando en la implementación de soluciones de riego inteligente y monitoreo de cultivos en Colombia.
- Netafim: una empresa global líder en tecnología de riego por goteo y agricultura de precisión.
- Rivulis: otra empresa especializada en tecnologías de riego y agricultura de precisión, con presencia en Colombia.

En cuanto a los productos agrícolas en Colombia que se benefician de esta tecnología, se enmarcan algunos cultivos representativos:

- **Café:** es uno de los cultivos más importantes del país; el uso de sistemas de riego basados en sensores inteligentes puede ayudar a optimizar y mejorar la calidad del riego.
- **Flores:** Colombia es conocida por ser uno de los principales exportadores de flores del mundo. La tecnología de riego inteligente puede mejorar el cultivo y prolongar la vida útil de las flores cortadas.
- **Frutas y hortalizas:** cultivos como aguacates, tomates, cítricos y bananos también pueden beneficiarse del riego inteligente para garantizar un suministro adecuado de agua y maximizar la producción.

En cuanto a las exportaciones agrícolas de Colombia, es importante destacar que los datos comerciales pueden variar anualmente debido a las condiciones del mercado y otros factores. En los últimos dos años, el país ha experimentado un crecimiento en las exportaciones agrícolas de 42 %, aproximadamente, al pasar de 40 a 88 millones de dólares, con productos como café, flores, banano, aguacate y frutas frescas.

La incorporación de tecnologías IoT, como Sigfox y LoRaWAN, en una política de desarrollo agrícola en un país como Colombia, puede impulsar la modernización del sector al permitir la adopción de soluciones inteligentes y conectadas. Mediante el despliegue de infraestructura de red, capacitación y apoyo a la investigación, los agricultores pueden beneficiarse de la monitorización remota de cultivos, recursos naturales y ganado, lo que lleva a una mayor eficiencia en el uso de recursos, una mejora en la productividad y la sostenibilidad agrícola.

Además, al facilitar el acceso a financiamiento y fomentar la colaboración público-privada, se pueden superar barreras económicas y tecnológicas, lo que permite que los países en desarrollo aprovechen las ventajas de estas tecnologías para fortalecer la seguridad alimentaria y el desarrollo económico en las áreas rurales.

IPv6 debe ser utilizado debido a la escasez de direcciones IPv4 y al crecimiento exponencial de dispositivos conectados a internet. Con su amplio

espacio de direcciones, IPv6 satisface la demanda actual y futura de conexiones, lo que posibilita el desarrollo del IoT y la industrialización inteligente.

Sin embargo, al implementar IPv6, es esencial considerar la seguridad desde el inicio. Incorporar protocolos como IPsec para cifrar y autenticar datos, utilizar direcciones temporales para preservar la privacidad y aplicar políticas de seguridad, como QoS y RA Guard, son medidas cruciales para proteger la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos y dispositivos conectados. La seguridad en IPv6 es un componente esencial para garantizar la confianza y el éxito de una infraestructura de comunicación global en constante expansión.

La integración de la telefonía celular 5G, IPv6 e IoT en el desarrollo de la agricultura inteligente es un enfoque potente para transformar y mejorar la eficiencia agrícola. La implementación de redes 5G ofrece altas velocidades de conexión, baja latencia y mayor capacidad de transferencia de datos, lo que permite una conectividad más rápida y confiable para los dispositivos IoT utilizados en la agricultura inteligente. Al aprovechar las ventajas de 5G, se pueden transmitir datos en tiempo real, desde sensores y dispositivos conectados en los campos agrícolas, lo que permite una toma de decisiones más ágil y precisa para el monitoreo de cultivos, control de riego y manejo de recursos.

IPv6 desempeña un papel clave al proporcionar un espacio de direcciones suficiente para dar soporte a la gran cantidad de dispositivos IoT que se conectan a través de 5G. Con su amplio rango de direcciones, IPv6 permite una expansión masiva de la red de IoT sin preocuparse por la escasez de direcciones IP. Esto es fundamental para la agricultura inteligente, ya que se pueden asignar direcciones únicas a cada sensor y dispositivo, lo que facilita la identificación y gestión individualizada.

Finalmente, la agricultura inteligente, impulsada por IoT, puede beneficiarse de la velocidad y la conectividad confiable de 5G, que permite la rápida transmisión de datos desde los campos agrícolas hasta los sistemas de análisis y toma de decisiones. El uso de IPv6 garantiza que la comunicación y la conectividad sean seguras y escalables, y que los datos recopilados y transmitidos estén protegidos.

En conjunto, la expansión de redes 5G junto con IPv6 e IoT posibilita la construcción de sistemas agrícolas inteligentes más robustos, sostenibles y productivos. Esto permite que los agricultores tomen decisiones informadas en tiempo real, mejoren la eficiencia en el uso de recursos, aumenten la productividad y contribuyan a la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible en un contexto de agricultura cada vez más digitalizado y conectado.

Referencias

- Abderahman, A., Alireza, A., Karim, R. y Horst, T. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017>
- Aceros, D. (2020). *Prototipo de una ruta tecnológica para el IoT, enfocada en las tecnologías de riego, para los agricultores de pequeña escala en Colombia* [Tesis, Ingeniería de Sistemas, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio institucional. https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/11709/2020_Tesis_Daniel_Fabian_Aceros_Orduz.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Adhikary, A., Lin, X. y Eric, Y. (2016). Performance Evaluation of NB-IoT Coverage. *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. doi:10.1109/VTCFall.2016.7881160
- Alliance, Z. (2015). *ZigBee Specification*. <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>
- Álvarez, J. (2023). *Normatividades que aplican a la industria de drones en Colombia 2023*. <https://www.linkedin.com/pulse/normatividades-que-aplican-la-industria-de-drones-en-colombia-juan/>
- Amandeep, Bhattacharjee, A., Das, P., Roy, S., Ghosh, S. Saha, S. Pain, S., Dey, S. y Rana, T. K. (2017). Smart Farming Using IoT. *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication*

- Conference (IEMCON)*, Vancouver, Canada, 278-280. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2017.8117219>
- Arcos, C. (2021). *Nodos, sensores y protocolos de comunicación del Internet de las Cosas aplicados a la agricultura inteligente* [Tesis, Maestría en Electrónica y Automatización. Mención en Redes Industriales, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador]. Repositorio institucional. <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/27321>
- Arias, J. (2021). *Análisis de distintos tipos de coberturas mediante el uso de cámara multispectral tomadas desde dron en el Valle de Aburrá*. Universidad de Antioquia.
- Ashton, K. (2009). *Multi-Zone ToF Sensor Offers Camera-like Field of View*. <https://www.rfidjournal.com/multi-zone-tof-sensor-offers-camera-like-field-of-view>
- Berni, J. (2009). *Determinación del estado hídrico de la vegetación mediante teledetección basada en vehículos aéreos no tripulados*. Universidad de Córdoba.
- Bonomi, F., Milito, R. y Zhu, J. (2012). Fog Computing and its role in the Internet of Things. En M. Gerla y D. Huang, *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile Cloud Computing* (pp. 13-16). Association for Computing Machinery.
- Bradner, S. (1993). *IETF. Next Generation (IPng) White Paper Solicitation*. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1550>
- Build, S. (2021). *Radio Configurations | Sigfox build*. <https://build.sigfox.com/sigfox-radioconfigurations->
- Burton, K. (2020). Review The ‘Real-Time’ Revolution for in situ Soil Nutrient Sensing. *J. Electrochem Soc*, 167(3). doi:10.1149/1945-7111/ab6f5d
- Castro, L. (2016). *Sensor de humedad del suelo tipo sonda con sistema de monitoreo para aplicaciones en agricultura de precisión* [Tesis, Ingeniería Electrónica, Universidad de los Llanos]. Repositorio institucional. <https://es.scribd.com/document/772177400/Runillanos-Ele-0373-Sensor-de-Humedad-Del-Suelo-Tipo-Sonda-Con-Sistema-de-Monitoreo-Para-Aplicaciones-en-Agricultura-de-Precision>
- Centenaro, M. (2015). *Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios*. <http://arxiv.org/abs/1510.00620>.

- Chapungo N. y Postolache, O. (2021). *Sensors and Communication Protocols for Precision Agriculture. 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania. doi:10.1109/ATEE52255.2021.9425126.
- Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L. y Ferrari, G. (2019). VegIoT Garden: a modular IoT Management Platform for Urban Vegetable Gardens, *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, Portici, Italy, 121-126. <http://dx.doi.org/10.1109/MetroAgriFor.2019.8909228>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (2022). *Concepto favorable a la nación para contratar un empréstito externo con la banca multilateral hasta por USD 35,3 millones o su equivalente en otras monedas, destinado a financiar el proyecto de iniciativas climáticamente inteligentes para la adaptación*. Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia.
- Croptracker. (2023). *Drone Technology in Agriculture*. <https://www.crop-tracker.com/blog/drone-technology-in-agriculture.html>
- Danita, M., Mathew, B., Shereen, N., Sharon, N. y Paul, J. (2018). IoT Based Automated Greenhouse Monitoring System, *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, Madurai, India, 1933-1937. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8662911>
- Deering, S. y Hinden, R. (2007). *Internet Protocol, version 6 (IPv6)*. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2460>
- Deschamps, M. (2007). Modelado de mecanismos de transición a IPv6 [Tesis, Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Universidad de las Américas Puebla]. Repositorio institucional. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/deschamps_e_me/
- Efor. (2017). *Tecnologías de comunicación para IoT*. <https://www.efor.es/recursos/tecnologias-de-comunicacion-para-iot.html>
- Egea, E. y Vales, J. (2004). *Una introducción a las redes de sensores inalámbricos*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Federación Nacional de Cafeteros (2023). *Sistema de Información Cafetero*. <https://sicanuevo.cafedecolombia.com/login>
- Gavade, L. y Bhoi, A. (2017). N, P, K Detection y Control for Agriculture Applications using PIC Controller: A Review. *Int. J. Eng. Res Technol*, 6(4), 638-641. www.ijert.org

- Guardo, A. (2018). A Fog Computing-based IoT framework for precision agriculture. *Journal of Internet Technology*, 1401-1411. <https://jit.ndhu.edu.tw/article/view/1760>
- Gutiérrez, C. (2020, 1 de octubre). *5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications (Spanish Version)*. https://www.researchgate.net/publication/350889517_5G_and_Beyond_Past_Present_and_Future_of_the_Mobile_Communications_Spanish_Version/citation/download
- Harrison, J. (2014). *An elementary look at 6LoWPAN networks*. <https://www.electronicproducts.com/an-elementary-look-at-6lowpan-networks/>
- Industry, M. (2019). *Ministry of Economy and Industry*. <https://itrade.gov.il/india/2019/12/26/israeli-startup>
- Instituto Geográfico Nacional. (2022). *Teledetección*. Centro Nacional de Información Geográfica.
- Jara, A., Fernández, D., López, P. y Zamora, M. (2014). Lightweight MIPv6 with IPSec support. *Mobile Information Systems*, 10(1), 37-77. https://www.researchgate.net/publication/262254191_Lightweight_MIPv6_with_IPSec_support
- Kogut, P. (2020). *Agricultura de precisión: de los libros a la realidad. (Eos Data)*. <https://eos.com/es/blog/agricultura-de-precision/>
- Lamaazi, H., Benamar, N. y Jara, A. (2014). Challenges of the Internet of Things: IPv6 and Network Management. *Proceedings 2014 8th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing IMIS 2014*. <https://dl.acm.org/doi/10.1109/IMIS.2014.43>
- López, A., Martínez, C., Ferro, R., Hernández, D. y Alonso, V. (2020). Network Traffic Modeling in a Wi-Fi System with Intelligent Soil Moisture Sensors (WSN) Using IoT Applications for Potato Crops and ARIMA and SARIMA Time Series. *Appl. Sci.*, 10(21), 7702. <https://doi.org/10.3390/app10217702>
- López, D. y Gelvez, N. (2010). Modelo para la integración de redes IPv4 e IPv6 basado en Tunnels. *Revista Tecnura*, 14(27), 52-59. <http://www.scie-lo.org.co/pdf/tecn/v14n27/v14n27a06.pdf>
- Loyola, P. (2015). Manual para la aplicación de la tecnología Zigbee para edificios inteligentes [Tesis, Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio institucional. <https://dspace.ups.edu.ec/bits-tream/123456789/7986/1/UPS-CT004855.pdf>

- Mecatrónica UASLP. (2010). *Tutorial Xbee parte 1: ¿Qué es un Xbee y qué es necesario?* <https://mecatronicauaslp.wordpress.com/2013/07/04/xbee-parte-1-que-es-un-xbee-y-que-es-necesario/#more-150>
- Mekki, E. (2018). Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT. *2018 IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. Work. PerCom Work. 2018*. doi:10.1109/PERCOMW.2018.8480255
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria*. <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Paginas/SNIA.aspx>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2022a). *Consulta Pública Desarrollo de 5G en Colombia*. MinTIC. https://mintic.gov.co/micrositios/plan_5g/764/w3-channel.html
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2022b). *Con Agro 4.0 se implementaron 10 planes piloto de tecnologías en cultivos*. <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/198945:Con-Agro-4-0-se-implementaron-10-planes-piloto-de-tecnologias-en-cultivos>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2023). *Con AgroTECH, el MinTIC potenciará el campo con Inteligencia Artificial*. <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/276923:Con-AgroTECH-el-MinTIC-potenciara-el-campo-con-Inteligencia-Artificial>
- Moreno, A. (2004). *IPv6 Interoperabilidad y robustez*. Instituto Politécnico Nacional México. <https://www.cs.cinvestav.mx/Estudiantes/TesisGraduados/2004/tesisAxelErnesto.pdf>
- Movistar. (2020). *Movistar empresas aliado de la agricultura en Colombia*. <https://www.telefonica.co/documents/1285851/407068477/01072020+-movistar+empresas+aliado+de+la+agricultura+en+colombia-def.pdf/35ef59ba-c128-48bb-b32a-6304ef2a0c05>
- Neyra, W. (2021). *5G. Beneficios y casos de uso en la agricultura*. ICT and Spectrum Management Coordinator at the Ministry of Transportation and Communications PERU.
- Nyambi, W. (2016). *The IoT Revolution: Challenges and Opportunities*. Gbnews. <https://www.gbnews.ch/the-iot-revolution/>

- Olivera-Jr, C. (2020). *IoT Sensing Platform for e-Agriculture in Africa*. *Sensors*, 20(12), 3511. <https://doi.org/10.3390/s20123511>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Food and Agriculture Organization of the United. FAO.
- Orionis. (2021). *Riego de precisión 4.0*. Orionis Smart Water Network. <https://orionis-iot.com/soluciones-y-aplicaciones/riego-4-0/>
- Orozco, Ó. y Llano, G. (2016). Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(28), 103-124. <https://doi.org/10.22395/rium.v15n28a6>
- Pardal, P. (2017). *Redes de área extensa para aplicaciones de IoT: modelado de comunicaciones Sigfox*. RiuNet. <https://riunet.upv.es/handle/10251/86052>
- Patel, D. (2017). Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things. *IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108501>
- Petajajarvi, J. (2015). On the coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology. *International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. Denmark, Copenhagen, 55-59. <https://doi.org/10.1109/ITST.2015.7377400>
- Pérez-García, M. (2014). Modelado y evaluación de la tecnología Sigfox para NS3. *Ingeniería del Agua*, 18(1), IX. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
- Poonia, R. (2001). *Smart Farming Technologies for Sustainable Agricultural Development*. IGI Global. <https://www.igi-global.com/book/smart-farming-technologies-sustainableagricultural/193678>
- Rastogi, N. (2020). Narrowband Internet of Things: A Comprehensive Study. *Computer Networks*, 173, 107209. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107209>
- Renke. (2022). *Renkeer*. <https://www.renkeer.com/product/soil-npk-sensor/>
- Reynders, B. (2016). Range and Coexistence Analysis of Long-Range Unlicensed Communication. *23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, Thessaloniki, Greece, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICT.2016.7500415>

- Rodríguez, J. (2015). *Sistema de comunicación inalámbrico basado en el protocolo Zigbee*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Romano, F. (2015). *Learning Python: Learn to code like a professional with Python-an open source, versatile, and powerful programming language*. Packt Publishing.
- Sang-Do Lee, M. (2007). *EPC and IPv6 mapping*. <https://www.proceedings.com/01189.html>
- Santana, I., Cárdenas, A., Sosa, R. y Portal, J. (2020). Monitoreo de parámetros ambientales en casas de cultivo a través de aplicación IoT. *Revista Cubana de Transformación Digital*, 1(1), 53-62. <https://rctd.uic.cu/rctd/article/view/46>
- Sierra, J. y Cepeda, O. (2019). Diseño de un sistema tecnológico que se basa en agricultura inteligente que permita mitigar el impacto del cambio climático en la productividad del cultivo de fresas. Caso de estudio Hacienda La Colorada en el departamento de Norte de Santander [Tesis, Maestría en Dirección, Universidad del Rosario]. Repositorio institucional. https://doi.org/10.48713/10336_20551
- Tech, T. (2020). *Telefónica y Vertical Green digitalizan la producción agrícola en España*. Telefónica Tech. <https://iot.telefonica.com/es/whats-new/news/telef%C3%B3nica-y-vertical-green-digitalizan-la-producci%C3%B>
- Telcel. (2022). *Aplicaciones de la red 5G en la industria agropecuaria*. Red 5G y sus repercusiones agropecuarias. <https://www.telcel.com/empresas/tendencias/notas/aplicacion-red-5g-en-la-industria-agropecuaria>
- Torres, L., Romero, L., Aguirre, E. y Ferro, R. (2023). IoT Detection System for Mildew Disease in Roses Using Neural Networks and Image Analysis. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 8(4), 105-116. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2023.07.001>
- Tovar, J., Solórzano, J. y Badillo, A. (2019). Internet de las Cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, 22, 86-105. <https://www.re-dalyc.org/journal/6139/613964509009/html/>
- Urbano-Molano, F. (2013). Redes de sensores inalámbricos aplicadas a optimización en agricultura de precisión para cultivos de café en Colombia. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 5(1), 46-52. <https://jci.uniautonoma.edu.co/2013/2013-8.pdf>

- Vangelista, L. (2017). Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12), 1818-1821. doi:10.1109/LSP.2017.2762960
- Vera, C., Barbosa, J. y Pabón, D. (2017). La tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física ZigBee. *Scientia Et Technica*, 22(3), 238-245. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84954626002.pdf>
- Vidal, J. (2021). *Desarrollo de una red de sensores para monitoreo de macronutrientes primarios para cultivo de café aplicado a un caso de estudio en Tecnicafé* [Tesis, Ingeniería Electrónica, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uniautonomia.edu.co/handle/123456789/661>.
- Wang, Y. (2016). *A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT)*. arXiv: <http://arxiv.org/abs/1606.04171>
- Wayra/Movistar/Cemprende. (2019). *IoT LAB*. Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones.
- Worldometer. (2024). Real Time World Statistics. Current World Population. *Worldometer*. <https://www.worldometers.info/>

Autores

Roberto Ferro Escobar

Ingeniero Electrónico y Magister en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctor en Ingeniería Informática, Sociedad de la Información y Gestión del Conocimiento de la Universidad Pontificia de Salamanca. Fue Coordinador del Proyecto Curricular de Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Decano de la Facultad de Ingeniería y Director de la Red de Investigaciones de Tecnología Avanzada (RITA). Jefe de la Oficina de Extensión - IDEXUD y docente titular de carrera en la misma Universidad. Director del Grupo de Investigación LIDER - Laboratorio de Investigaciones y Desarrollo en Electrónica y Redes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Carlos Andrés Martínez Alayón

Ingeniero Electrónico y Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones con énfasis en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista Tecnológico en Seguridad de Redes. Estudiante del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ha trabajado como coordinador y gestor de proyectos en redes académicas y de investigación, y actualmente es coordinador en

RITA-UD. Codirector del Grupo LIDER - Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Redes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Con experiencia profesional en diseño e implementación de redes y servicios de telecomunicaciones e informática. Docente en el área de Redes y Telecomunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edgar Alirio Aguirre Buenaventura

Doctor en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magister en Ciencias de la Información y la Comunicación. Ingeniero en Control Electrónico. Tecnólogo en Electrónica. Se desempeña como coordinador del Centro Universitario San Cristóbal Usaquén de la Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO), y es profesor del programa de Tecnología Electrónica de la UNIMINUTO.

Este libro se terminó de imprimir en noviembre de 2024
en E-Design Ltda.
Bogotá, D. C., Colombia

El desarrollo de la agricultura inteligente junto al Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías de punta permiten potencializar los recursos que provienen de la industria que desarrolla los productos agrícolas; por ello, es importante no solo pensar en ciudades inteligentes, sino también en el cambio de paradigma a nivel rural en Colombia como una contribución a la seguridad alimentaria y fuente de fortalecimiento del país como una potencia agrícola a nivel nacional y mundial.

El avance de la agricultura inteligente, impulsado por el IoT y las tecnologías de vanguardia, está transformando la manera en que gestionamos los recursos agrícolas. Este libro ofrece un aporte, desde la investigación, de cómo estas innovaciones potencian la seguridad alimentaria y contribuyen al crecimiento de Colombia como una potencia agrícola mundial. A lo largo de sus capítulos, el lector descubrirá tecnologías emergentes, como redes LPWAN, drones para agricultura de precisión, redes 5G y soluciones basadas en IPv6, así como políticas rurales y casos de estudio en conectividad rural.

Esta obra es una invitación a reimaginar el campo y adoptar un paradigma más inteligente, eficiente y sostenible. Su lectura es ideal para aquellos interesados en la interrelación entre tecnología, agricultura y desarrollo rural. Este manuscrito busca ser una herramienta clave para ingenieros, agricultores y responsables de las políticas públicas que deseen entender y aplicar el poder transformador de las TIC en la agricultura inteligente para el desarrollo del país.



ISBN 978-958-787-730-4



9 789587 877304