



**REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS PARA
INTERNET DE LAS
COSAS APLICADO
A LA PRODUCCIÓN
AGRÍCOLA**

Agosto, 2021

**SERIE
FPTA-INIA**

94

REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA INTERNET DE LAS COSAS APLICADO A LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

PROYECTO FPTA-313.

GERVASIO: Generalización de las redes de sensores inalámbricos como herramienta de valorización en sistemas vegetales intensivos.

Director del proyecto: Fernando Abel Silveira Noguero ^{*}

Institución ejecutora: Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

Equipo de trabajo: Leonardo Steinfeld ^{*}
Leonardo Barboni ^{*}
Javier Schandy ^{*}
Federico Favaro ^{*}
Álvaro Gómez ^{*}
Juan P. Oliver ^{*}
Fernando Silveira ^{*}

Título: REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA INTERNET DE LAS COSAS
APLICADO A LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Director del proyecto: Fernando Abel Silveira Noguero

Institución ejecutora: Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

Equipo de trabajo: Leonardo Steinfeld, Leonardo Barboni, Javier Schandy,
Federico Favaro, Álvaro Gómez, Juan P. Oliver, Fernando Silveira.

e-ISBN: 978-9974-38-457-6

Serie: FPTA N° 94

© 2021, INIA

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA
Avda. Italia 6201, Edificio Los Guayabos, Parque Tecnológico del LATU,
Montevideo - Uruguay
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

Ing. Agr. José Bónica - Presidente

Ing. Agr. Walter Baethgen - Vicepresidente



**Ministerio
de Ganadería,
Agricultura y Pesca**

Ing. Agr. Rafael Secco

Ing. Agr. Martín Gortari



Ing. Agr. Alberto Bozzo

Ing. Agr. Alejandro Henry



FONDO DE PROMOCIÓN DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) fue instituido por el artículo 18° de la ley 16.065 (ley de creación del INIA), con el destino de financiar proyectos especiales de investigación tecnológica relativos al sector agropecuario del Uruguay, no previstos en los planes del Instituto.

El FPTA se integra con la afectación preceptiva del 10% de los recursos del INIA provenientes del financiamiento básico (adicional del 40/00 del Impuesto a la Enajenación de Bienes Agropecuarios y contrapartida del Estado), con aportes voluntarios que efectúen los productores u otras instituciones, y con los fondos provenientes de financiamiento externo con tal fin.

EL FPTA es un instrumento para financiar la ejecución de proyectos de investigación en forma conjunta entre INIA y otras organizaciones nacionales o internacionales, y una herramienta para coordinar las políticas tecnológicas nacionales para el agro.

Los proyectos a ser financiados por el FPTA pueden surgir de propuestas presentadas por:

a) los productores agropecuarios, beneficiarios finales de la investigación, o por sus instituciones.

b) por instituciones nacionales o internacionales ejecutoras de la investigación, de acuerdo a temas definidos por sí o en acuerdo con INIA.

c) por consultoras privadas, organizaciones no gubernamentales o cualquier otro organismo con capacidad para ejecutar la investigación propuesta.

En todos los casos, la Junta Directiva del INIA decide la aplicación de recursos del FPTA para financiar proyectos, de acuerdo a su potencial contribución al desarrollo del sector agropecuario nacional y del acervo científico y tecnológico relativo a la investigación agropecuaria.

El INIA a través de su Junta Directiva y de sus técnicos especializados en las diferentes áreas de investigación, asesora y facilita la presentación de proyectos a los potenciales interesados. Las políticas y procedimientos para la presentación de proyectos son fijados periódicamente y hechos públicos a través de una amplia gama de medios de comunicación.

El FPTA es un instrumento para profundizar las vinculaciones tecnológicas con instituciones públicas y privadas, a los efectos de llevar a cabo proyectos conjuntos. De esta manera, se busca potenciar el uso de capacidades técnicas y de infraestructura instalada, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos nacionales para resolver problemas tecnológicos del sector agropecuario.

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria contribuye de esta manera a la consolidación de un sistema integrado de investigación agropecuaria para el Uruguay.

A través del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), INIA ha financiado numerosos proyectos de investigación agropecuaria a distintas instituciones nacionales e internacionales. Muchos de estos proyectos han producido resultados que se integran a las recomendaciones tecnológicas que realiza la institución por sus medios habituales.

En esta serie de publicaciones, se han seleccionado los proyectos cuyos resultados se considera contribuyen al desarrollo del sector agropecuario nacional. Su relevancia, el potencial impacto de sus conclusiones y recomendaciones, y su aporte al conocimiento científico y tecnológico nacional e internacional, hacen necesaria la amplia difusión de estos resultados, objetivo al cual se pretende contribuir con esta publicación.

CONTENIDO

Página

REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA INTERNET DE LAS COSAS APLICADO A LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	7
RESUMEN EJECUTIVO	7
PRÓLOGO	8
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. AGRICULTURA DE PRECISIÓN	10
1.2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADOS A LA AGRICULTURA	11
1.3. CASOS DE ESTUDIO	11
1.3.1. Detección de heladas	11
1.3.2. Detección de plagas	13
2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA INTERNET DE LAS COSAS	15
2.1. EL SENSOR INALÁMBRICO	15
2.2. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN DE LOS SENSORES	17
2.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN IEEE 802.15.4/6LOWPAN	18
3. EXPERIENCIAS PILOTO	20
3.1. CONCENTRADOR O BASE	20
3.2. NODO	20
3.2.1. Detección de heladas	20
3.2.2. Detección de plagas	23
3.3. INSTALACIONES PILOTO	28
3.3.1. Detección de heladas	28
3.3.2. Detección de plagas	29
4. CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFÍA	33
REFERENCIAS CITADAS	33
PUBLICACIONES DERIVADAS DEL PROYECTO	34
TESIS DE GRADO DIRECTAMENTE RELACIONADAS CON EL PROYECTO	34
PUBLICACIONES PROPIAS RELACIONADAS CON EL PROYECTO	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1.1. Mañana de helada en una plantación de mandarinos	11
Figura 1.2. Tecnologías de adquisición de datos (fuente de las figuras: (a) s/d de autor, vía http://www.decagon.com ; (b) J. Delince, 18/11/2011, vía Wikipedia; (c) s/d de autor, vía http://blog.xbow.com)	13
Figura 2.1. Diagrama de bloques de un nodo	15
Figura 2.2. Diferentes formas de organización de la red	16
Figura 2.3. Comparación entre comunicación multihop y directa (un salto)	17
Figura 3.1. Diagrama de bloques del concentrador	21
Figura 3.2. Concentrador instalado en campo en un predio citrícola	21
Figura 3.3. Nodo sensor de monitoreo microclimático. En la fotografía de la derecha, con la tapa de la caja abierta, se puede observar la electrónica (con la conexión de los sensores en la parte inferior) y las pilas	22
Figura 3.4. Nodo sensor de monitoreo microclimático completo, antes de ser instalado, donde se puede apreciar el soporte y la base	23
Figura 3.5. Diagrama de bloque funcional del nodo para detección de plagas. La fuente de alimentación consiste en 3 pilas alcalinas AA	23
Figura 3.6. Fotografía del nodo construido para la detección de plagas (no se muestra la cámara ni los demás componentes instalados en la trampa)	24
Figura 3.7. Fotografía de la trampa implementada en acrílico y entregada a Jumecal para evaluación. En la parte superior, en el interior de la trampa, se ubica el sistema de adquisición de imágenes	24
Figura 3.8. Simulaciones numéricas del movimiento del aire y dispersión de las feromonas de las trampas comerciales modelos Wing y la trampa propuesta. Figura tomada de (von Römer, 2016)	25
Figura 3.9. Fotografía de la última versión de la trampa construida en cartonplast	25
Figura 3.10. Software de usuario y marcado de un insecto en la parte inferior izquierda de la imagen ..	26
Figure 3.11. Marcado (borde azul) de un insecto en la parte inferior media de la imagen	27
Figure 3.12. Se mantiene marcado el insecto de la Figura 3.11 en la imagen siguiente del mismo nodo (ahora con borde rojo) y se agrega el marcado de un insecto en la parte superior izquierda de la imagen (con borde amarillo)	27
Figure 3.13. Interfaz de software de usuario mostrando varios elementos marcados	28
Figura 3.14. Ubicación de los nodos de la red instalados en el predio considerado en Margat Canelones .	28
Figura 3.15. Ejemplo de datos recabados de humedad de aire	29
Figura 3.16. Ubicación de los nodos de la red instalada en predio cultivado: nodos con trampas (n1, n2, n3), nodo n4 repetidor y nodo receptor (server en la sede de Jumecal). Se incluyen las coordenadas de los nodos	30
Figura 3.17. Trampa de cartonplast colocada en el árbol	31

L. Steinfeld*, L. Barboni*, J. Schandy*,
F. Favaro*, A. Gómez*, J.P. Oliver*,
F. Silveira*

*Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería,
Universidad de la República

RESUMEN EJECUTIVO

Proyecto FPTA 313

Período de Ejecución: Jun. 2014-Nov. 2017

Las redes de sensores inalámbricos son tecnologías de la información capaces de asistir a la producción agrícola con costos de implementación y uso cada vez más accesibles y rentables. Constituyen una herramienta de uso creciente, que permite monitorear dentro de un predio agrícola los parámetros más importantes de los procesos, ya sean climáticos o agronómicos. Esta información puede estar disponible a través de Internet, en un teléfono celular o en un PC instalado en el hogar del productor, permitiendo observar en cualquier momento la información capturada desde el predio.

Por ejemplo, permite observar humedad en el suelo, ayudando a evaluar las necesidades hídricas del cultivo, e incluso controlar el riego, o alertar y registrar la duración de un evento meteorológico adverso sobre la calidad de la fruta o cultivos expuestos, entre otras. Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación en nuestro medio de dos redes aplicadas a la producción frutícola, donde se muestra su gran potencialidad. Se demuestra su utilidad como herramienta para la agricultura de precisión.

PRÓLOGO

El presente documento presenta el desarrollo y los principales resultados obtenidos del Proyecto FPTA 313 «GERVASIO: Generalización de las redes de sensores inalámbricos como herramienta de valorización en sistemas vegetales intensivos» ejecutado entre los años 2014 y 2017. Parte del equipo de trabajo había participado en el Proyecto FPTA 280, «SIMPA: Sensores Inalámbricos para Manejo Informado de Producciones Agrarias» entre los años 2009 y 2011, en el que se validó por primera vez una red de sensores inalámbricos en una aplicación productiva agrícola en un predio de Milagro S.A. (Chapicuy). Anteriormente precedieron a estos proyectos otros que directamente o indirectamente aportaron para avanzar en el desarrollo de la tecnología de redes de sensores inalámbricos en la producción agrícola. A todos ellos nuestro reconocimiento.

En el presente proyecto participaron muchas personas que no están incluidas dentro de los autores de la publicación, pero que su participación fue fundamental para su concreción. A continuación se reconoce la participación de todos ellos y se agradece a las personas que de una forma u otra también contribuyeron a su realización.

A Ing. Mariana Espino por la gestión del apoyo de Urud'Or S.A. y al Ing. Martín Lanfranco por las fructíferas discusiones y definición de requerimientos para el monitoreo microclimático. A Agustín Olascuaga, productor cítrico miembro de Urud'Or donde se instaló el piloto de monitoreo microclimático, quien nos recibió de manera excelente en su establecimiento en Margat y a Juan Bentancourt quien siempre estuvo bien dispuesto a ayudar.

A Ing. Carlos Croce de Jumecal y su equipo humano por la definición de requerimientos para el monitoreo de plagas, los predios puestos a disposición para las pruebas y las fructíferas discusiones.

A docentes y estudiantes del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería: Andrés Alcarráz, Mariana Siniscalchi, Bernardo Marengo, Agustín Rodríguez, Pablo Modernell y también a los funcionarios no docentes: Roberto Rodríguez, Sergio Beheregaray y José Luis Vila.

Los siguientes estudiantes realizaron su proyecto de fin de carrera en Ing. Eléctrica en temas del proyecto: Ignacio Abadie, Mauro Martínez y Aldo Vignone («Agrovisión: Red de sensores inalámbricos para la previsión y tratamiento de plagas en cultivos frutales», 2016).

Florencia Arbío, Federico López y Miguel Pereyra («WSNvision», 2015); Cecilia Cardozo, Ignacio Camps y Martín Driedger («RSItrust: Red de Sensores inalámbricos para monitoreo de condiciones microclimáticas en cultivos de cítricos», 2015); Mauricio González, Javier Schandy y Nicolás Wainstein («Plagavisión: Desarrollo de un prototipo de nodo WSN con capacidad visual para la detección temprana de plagas», 2014).

Los estudiantes Andrés Vera y Maite Ibarburu realizaron su proyecto de grado de Ing. en Computación («Sistema para el análisis de datos de Sensores en el Agro», 2015), dirigidos por Ing. Raquel Sosa.

El estudiante Joaquín Díaz de la Escuela Universitaria Centro de Diseño (FADU) trabajó en el diseño mecánico de la protección meteorológica y soporte para el nodo para el monitoreo microclimático en cítricos.

El estudiante de maestría en Ing. Física (Technische Universität Berlin) dirigido por el Prof. Gabriel Usera (IMFIA, FING) realizó la evaluación aerodinámica de la trampa de insectos.

Aprovechamos la oportunidad para agradecer además al Ing. Agr. Daniel Garín y al Ing. Agr. Nelson Barlocco por su participación en

proyectos anteriores. También muy especialmente al Ing. Agr. Alvaro Otero (INIA Salto) y a la Ing. Agr. Celmira Saravia (FAGRO) quienes participaron del Proyecto FPTA SIMPA.

A Ing. Pablo Mazzara quien participó activamente en todos los proyectos anteriores hasta su jubilación. Asimismo agradecemos a otros que contribuyeron de distintas formas y no figuran en esta lista.

Finalmente agradecer a CSIC y el Programa de grupos I+D por la financiación del programa «Circuitos y Sistemas Integrados Biomédicos Autónomos y Conectados» del Grupo de Microelectrónica del Departamento de Electrónica del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Udelar. En este programa se enmarcan líneas de trabajo que son continuación de lo aquí presentado.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos están compuestas por un gran número de dispositivos electrónicos de pequeño tamaño equipados con sensores que se comunican con otros dispositivos de manera inalámbrica formando una red de comunicación. Los datos son transmitidos, utilizando tecnologías de comunicación de Internet, a una plataforma para el desarrollo de aplicaciones, dando lugar a lo que se conoce hoy como Internet de las cosas o IoT (sigla del término en inglés, *Internet of Things*). Esta nueva tecnología permite aplicar técnicas de agricultura de precisión, como se describe más adelante.

El presente trabajo describe el uso de las redes de sensores inalámbricos aplicadas a la producción agrícola en dos casos particulares: i) detección de heladas en plantaciones de citrus y ii) detección y conteo de capturas de grafolita en trampas con feromonas utilizadas en los sistemas de confusión sexual en plantaciones de manzanos. En este capítulo introductorio se describen brevemente los conceptos detrás de la agricultura de precisión, presentando de manera resumida los problemas abordados, para luego ejemplificar el uso de las redes de sensores inalámbricos en los casos de estudio. En el capítulo 2 se presenta de manera detallada las redes de sensores inalámbricos, introduciendo los principales conceptos y problemas a resolver para su efectiva adopción.

En el capítulo 3 se describen dos experiencias piloto de redes de sensores instaladas en un predio cítrícola y en un predio de producción de manzanas. Se presentan los resultados obtenidos desde el punto de vista del desempeño de los sistemas desarrollados, mostrando su gran potencialidad para detectar problemas en tiempo real y poder así solucionarlos adecuadamente, procurando no dejar que se vean afectadas la productividad y/o la calidad del producto. Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las principales conclusiones.

1.1. AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La agricultura de precisión es un concepto de gestión agronómica que busca optimizar el manejo de los cultivos y la utilización de los insumos agropecuarios, proporcionando máxima rentabilidad económica. Está comprendida por un conjunto de técnicas y metodologías basadas en la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y las plantas de los cultivos (Molin, 2011). El término agricultura de precisión inicialmente estaba asociado al uso de tecnologías basadas en Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) e imágenes satelitales y aéreas, junto con Sistemas de Información Geográfico (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. Sin embargo, puede ser extendido a la incorporación de otras tecnologías de información en la producción agropecuaria para ayudar a gestionar en modo eficiente el uso de los predios agrícolas. Disponer de la información de los parámetros de los procesos productivos en tiempo real, permite un aumento de la productividad y de la calidad del producto y, en consecuencia, de la rentabilidad final. Las redes de sensores inalámbricos se suman a las fuentes de información de las IoT agrícolas conformando la infraestructura de base para la instalación de una gran variedad de sensores para medir magnitudes climáticas o agronómicas de interés. Por ejemplo, disponer de la temperatura en una gran cantidad de puntos geográficos permite captar las variaciones espacio-temporales de temperatura y alertar de variaciones zonales no previstas por las medias climáticas (Pascale, 2004). También permite implementar riego de precisión, si se utilizan sensores de humedad de suelo, y así suministrar de manera diferencial agua y fertilizantes por sectores.

1.2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADOS A LA AGRICULTURA

Los dispositivos electrónicos que forman parte de una red de sensores se comunican de manera inalámbrica entre sí formando una red de comunicación. Cada uno de estos dispositivos es un nodo de la red, por lo que los denominaremos de esa manera (nodo). Estos dispositivos son los que convierten a las redes de sensores inalámbricos en herramientas prometedoras para el monitoreo ambiental en general y para la agricultura de precisión por los siguientes motivos: i) su bajo costo permite adquirirlos en grandes cantidades permitiendo construir redes de sensores con elevada cantidad de nodos por unidad de área, ii) esa elevada densidad de sensores permite construir mapas espacio-temporales de las magnitudes de interés, iii) el bajo costo y la característica de ser inalámbricos simplifican la instalación y reduce sus costos, así como los de mantenimiento, iv) la dimensión y densidad de la red son fácilmente escalables, y finalmente, v) los elementos electrónicos mencionados previamente pueden funcionar con bajo consumo de energía, por lo que los sensores pueden alcanzar autonomías de varios meses y hasta más de un año cuando se utilizan baterías pequeñas y disponibles fácilmente (por ejemplo, pilas alcalinas de tipo AA). Luego de las primeras investigaciones y

experiencias piloto de aplicación de estas redes a la producción agraria, como en viñedos en California (Holler, 2008), aparecen en el mercado internacional las primeras redes de sensores inalámbricos específicamente orientadas a aplicaciones agrícolas. Por ello es fundamental desarrollar esta tecnología en nuestro país para una buena adecuación a nuestra escala y necesidades, así como para contar con un dominio local de esta tecnología.

En la siguiente sección introduciremos el uso de las redes de sensores inalámbricos en la agricultura a través de la descripción de los dos problemas elegidos como casos de estudio.

1.3. CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio abordados en el proyecto se centran en la gestión de riesgos mediante la detección de heladas y de plagas en los cultivos, las que son descritas en las siguientes secciones. No obstante, existen otras aplicaciones de redes de sensores inalámbricos a la producción agrícola que podrían beneficiarse del monitoreo remoto, distribuido y en tiempo real de variables de interés.

1.3.1. Detección de heladas

Se denomina helada al evento climático en el cual la temperatura del aire es inferior a 0 °C.



Figura 1.1. Mañana de helada en una plantación de mandarinos.

Los tejidos vegetales sensibles sometidos a una helada pueden sufrir daños, con un efecto significativo en la producción.

Por ejemplo, en los EE.UU hay más pérdidas económicas por el daño de las heladas que por cualquier otro evento relacionado con la meteorología (Snyder, 2010). Por lo tanto, los impactos sobre los agricultores afectados y sobre la economía local son, con frecuencia, devastadores. Las heladas según las condiciones meteorológicas que las generan se pueden clasificar en heladas por radiación o heladas por advección. Las heladas de radiación están asociadas con el enfriamiento nocturno debido a la pérdida de energía por radiación, esta pérdida se ve favorecida en noches despejadas y en calma (sin viento), lo que provoca que el aire se estratifique según su temperatura y se den condiciones de inversión térmica (la temperatura del aire aumenta con la altura). Este tipo de heladas es la más común en nuestro país. Las heladas por advección están generadas por el ingreso a gran escala de aire frío con nubosidad, vientos moderados a fuertes (atmósfera bien mezclada, sin inversión térmica) y con temperaturas del aire por debajo de cero, incluso durante el día. En algunos casos, se produce una combinación tanto de condiciones advectivas como radiativas. Por ejemplo, luego del ingreso a una región de una masa de aire frío por advección que provoca un descenso pronunciado de la temperatura del aire, pueden sucederse varios días despejados, con condiciones de calma que conducen a heladas de radiación, estas son las denominadas heladas mixtas. La mayoría de los métodos de protección activos contra heladas trabajan mejor con la presencia de una inversión térmica, por lo que las heladas por advección son difíciles de combatir.

Se han realizado gran cantidad de estudios utilizando datos históricos de temperatura e información topográfica que muestran una estrecha relación entre la elevación y el riesgo de temperatura bajo cero (Kalma, 1992). Los mapas de riesgo pueden ser utilizados para proteger los cultivos de las heladas por radiación evitando las zonas bajas. Sin embargo, los mapas de riesgo basados en información histórica para clasificar las zonas lleva a un uso ineficiente de la tierra, en caso de tomar decisiones conservadoras y destinar para cultivo

solamente las zonas de bajo riesgo. Por otro lado, cultivos dispuestos en zonas de riesgo medio pueden sufrir heladas provocando pérdidas. En conclusión, disponer de información detallada de temperatura adquirida en tiempo real permitiría un mejor aprovechamiento de la tierra. En citrus, la determinación de la intensidad y duración de las heladas en función de la posición geográfica permite cuantificar su impacto en la calidad del fruto y su conservación (Slaughter, 2008). Los datos adquiridos junto con un sistema de alerta integrado a algún sistema de protección activo permitiría mitigar el efecto de las heladas. Por otro lado, permitiría planificar la cosecha por zonas para su posterior comercialización, en función de la real exposición de la fruta a las heladas.

Cuando se dispone de un método de protección activo contra heladas, la operación usual actualmente es la siguiente. Ante la proximidad de una helada, los operarios permanecen la noche alertas, consultando frecuentemente los termómetros instalados entre los cultivos. Cuando la temperatura se aproxima a 0 °C se debe activar a tiempo el método de control de heladas provisto para ello. Si bien se argumenta que la presencia de los operarios en los cultivos es muy importante, este método requiere gran esfuerzo durante noches muy frías y no está librado de errores humanos con consecuencias económicas importantes. Por otro lado, los métodos más usados para acceder a registros de temperatura extremas han sido los termómetros de mínima y máxima que se consultan diariamente. Estos datos son útiles para determinar, en parte, el estrés térmico de los cultivos. Pero este método no permite registrar la duración de las heladas, dato fundamental y complementario del valor de temperatura mínima, para evaluar la gravedad de una helada.

Los registradores o dataloggers por su nombre en inglés (Fig. 1.2 a), miden y guardan periódicamente la temperatura, permiten determinar la duración de las heladas, luego de recorrer el campo para recoger los datos para su posterior análisis.

Sin embargo, la información no se dispone en tiempo real. Este último aspecto hace que estos datos no puedan ser utilizados para la toma de decisiones correctivas que puedan ser



Figura 1.2. Tecnologías de adquisición de datos (fuente de las figuras: (a) s/d de autor, vía <http://www.decagon.com>; (b) J. Delince, 18/11/2011, vía Wikipedia; (c) s/d de autor, vía <http://blog.xbow.com>).

aplicadas a tiempo. Para compensar esta limitación existen soluciones de registradores que agregan comunicación inalámbrica directa con una estación base vía un radio enlace (UHF por ejemplo) o utilizando la red celular. Usando estas tecnologías se podrían incrementar los puntos de medida para captar las variaciones espaciales de las variables de interés. No obstante, los costos asociados a la instalación y operación son muy elevados, si se requieren muchos puntos de medida. En el caso de radioenlaces esto se debe principalmente a que la comunicación de cada equipo con la base debe cubrir distancias importantes, ya que cada equipo se comunica directamente con ella. Esto aumenta el costo del hardware, en particular de la radio, y como necesita mayores niveles de potencia de radiofrecuencia, requiere baterías y/o paneles solares de mayores dimensiones. En el caso de la red celular, el costo de conexión recurrente incrementa el costo total en redes con gran cantidad de puntos de medidas.

Por último, existen mini-estaciones meteorológicas (Fig.1.2 b) también con comunicación inalámbrica con una base cercana o conectada directamente a Internet (vía red celular). Pero, debido a su alto costo, tener muchos puntos de medición resulta prohibitivo.

Las redes de sensores inalámbricos, por las características mencionadas anteriormente, y que se describen en detalle en el capítulo siguiente, permiten realizar el monitoreo continuo y en tiempo real de la temperatura u otras variables de interés en puntos distribuidos en el cultivo o plantación. La Fig. 1.2 c muestra un sensor o nodo de una red de sensores inalámbricos comercial.

1.3.2. Detección de plagas

La técnica de confusión sexual es un método actualmente muy usado para evitar que plagas, como las grafolita, dañen los cultivos de frutos con carozos, como las manzanas, duraznos y peras. El método se basa en colocar en los cuadros de los cultivos cebos con feromonas de la polilla hembra para confundir al macho y evitar, de esta manera, su reproducción. Para evaluar la efectividad del método, se utilizan trampas con un suelo que contiene pegamento y con un cebo de feromonas. De esta manera los insectos machos vuelan a la trampa y quedan atrapados. Un conteo por encima de cierto umbral de grafolitas atrapadas en la trampa dispara una alarma de existencia de plagas indicando que el método de confusión sexual no está funcionando, debiendo fumigar el predio

entero y probablemente los vecinos. El conteo debe realizarse por un operario especializado, y cada determinado tiempo, como ser en un espacio de tiempo de entre dos a tres semanas por trampa.

Una red de sensores con los nodos ubicados en las trampas puede ser de gran ayuda en este proceso. Los nodos toman fotos del piso diariamente con los insectos atrapados y mandan la información a un lugar centralizado donde un

operario las puede ver a través de una simple conexión a internet y realizar el conteo. El conteo se realiza así de manera remota sin necesidad de concurrir al predio, generando la posibilidad de activar la alarma de plaga inmediatamente y fumigar solamente el sector del predio afectado. Además contribuye a la creación de bases de datos regionales de poblaciones de plagas.

2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA INTERNET DE LAS COSAS

En el presente capítulo se describen los aspectos técnicos de las redes de sensores inalámbricos. Si bien está dirigido a un público amplio, el lector interesado solamente en aspectos de su uso agronómico puede pasar directamente al capítulo 3.

La aplicación más común de las redes de sensores inalámbricos consiste en la recolección, por parte de un nodo central o raíz, de los datos adquiridos por todos los sensores de la red donde se pone a disposición de los usuarios los datos recibidos. Las redes de sensores inalámbricos son fácilmente escalables, es decir, se pueden agregar nuevos nodos a los ya existentes sin necesidad de realizar ningún cambio en el sistema. En base a las características del hardware y del programa que se ejecuta en el procesador del nodo, se pueden alcanzar consumos de energía muy bajos lo que permite a los nodos tener autonomías de meses y hasta más de un año con baterías AA alcalinas estándar.

En este capítulo se introduce la tecnología de las redes de sensores inalámbricos, primero

describiendo el sensor inalámbrico o nodo, elemento constitutivo de la red. Luego se presentan las diferentes tecnologías disponibles en la actualidad. Finalmente, se describe más en detalle los protocolos utilizados en las soluciones del proyecto.

2.1. EL SENSOR INALÁMBRICO

Una red está formada por un gran número de dispositivos electrónicos de pequeño tamaño denominados nodos o motas¹. Cada nodo está construido con un microcontrolador (que integra en un solo chip: procesador, memoria y circuitos periféricos), sensores, una radio para comunicarse con otros nodos y una fuente de energía, según se muestra en la Figura 2.1.

La capacidad de cómputo de los procesadores utilizados en este tipo de dispositivo son equivalentes o superan la capacidad de las primeras computadoras personales (PC), pero

¹ Ocasionalmente se usa el término en inglés mote. El uso de este término se origina en la idea que puedan llegar a ser tan pequeños y abundantes como motas de polvo.

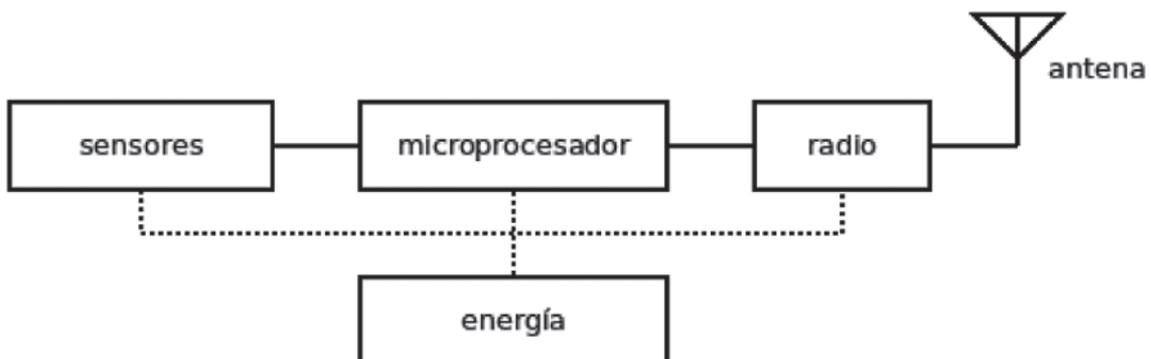


Figura 2.1. Diagrama de bloques de un nodo.

a la vez son muy limitados (para lograr su bajo consumo de energía) comparados con el estado actual de las mismas. Los microcontroladores típicamente tienen dos tipos de memoria: memoria RAM que es volátil, o sea, se pierde el contenido si el nodo no se energiza, por ej. porque se agota la batería, y memoria FLASH, que es no volátil, es decir, el contenido de la misma se mantiene aunque se quede sin energía. El programa se almacena en memoria FLASH (no se modifica una vez cargado) y la RAM se utiliza como memoria de trabajo donde se guardan los datos que se leen y escriben durante la ejecución del programa².

Los sensores son transductores basados en fenómenos más o menos complejos que traducen una magnitud no eléctrica (por ej. temperatura o humedad) en una señal eléctrica, que luego es adquirida por el procesador. Existen sensores cuya salida es una tensión, la cual es digitalizada usando un conversor analógico-digital (ADC, en inglés *analog-to-digital converter*). Otros ya proveen la medida digitalmente a través de una interfaz eléctrica (en general

² La evolución de la tecnología de memorias hace que la clasificación inicial entre RAM (memoria de acceso aleatorio, en inglés *random-access memory*) y ROM (memoria de solo lectura, en inglés *read-only memory*) sea obsoleta. Más adecuada es clasificarlas en: volátil y no volátil. En cada uno de estos grupos existen memorias que permiten acceso aleatorio, en contraposición al acceso secuencial, donde los datos leídos son contiguos.

serie, en la que los datos son transmitidos secuencialmente de a *bits*), que es conectada a uno de los puertos de comunicación del microcontrolador.

La radio implementa la comunicación inalámbrica y conceptualmente se puede separar en dos componentes: procesamiento de base y comunicación de radiofrecuencia. La primera la integran circuitos de procesamiento analógicos y digitales necesarios para la comunicación. La comunicación de radiofrecuencia está asociada a la potencia irradiada, potencia que es entregada por el amplificador de potencia a la antena, y está determinada por la señal requerida en el receptor y la pérdida del radioenlace entre el transmisor y el receptor. Asimismo los nodos cuentan con un receptor de radiofrecuencia para recibir información requerida por los propios protocolos de comunicación, información de otros nodos a retransmitir o información de la aplicación, como por ejemplo parámetros de configuración.

El avance de la microelectrónica ha permitido disminuir el tamaño de los transistores que componen los circuitos integrados, IC por sus siglas en inglés (*integrated circuit*) también llamados chips. Esta reducción redundo en un menor consumo de energía y también en un menor costo por función o prestación. Estas características hacen cada vez más accesible esta nueva tecnología.

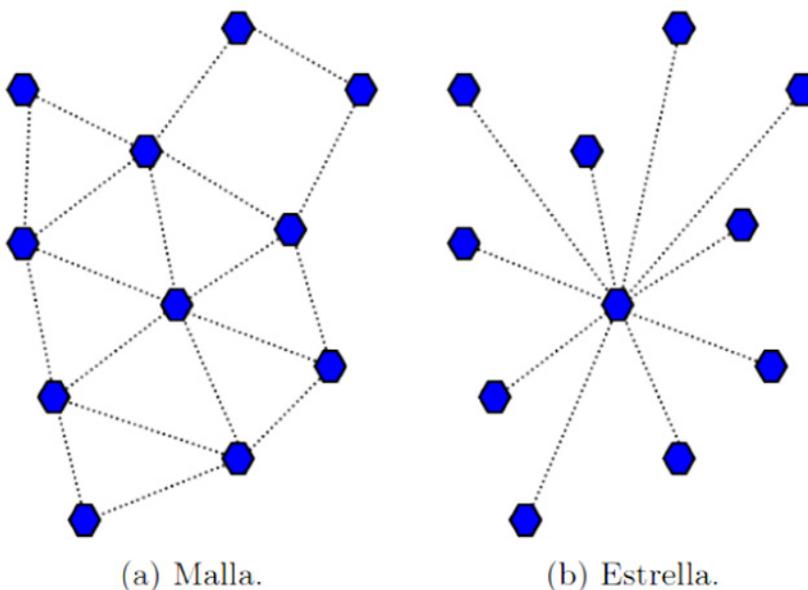


Figura 2.2. Diferentes formas de organización de la red.

2.2. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN DE LOS SENSORES

Las redes de sensores inalámbricos se pueden clasificar según la organización de los nodos en: i) estrella: donde cada nodo se comunica directamente con la base o en ii) malla: donde la información va pasando de un nodo a otro (red multisalto o multihop) hasta llegar a la base. La Figura. 2.2 muestra ambas opciones. La organización en malla es más conveniente cuando es necesario cubrir grandes áreas, porque se requiere menos potencia para transmitir la información.

La potencia necesaria para la transmisión directa es mucho mayor que la suma de potencias involucradas al retransmitir los datos por nodos intermediarios. Esto se puede ver fácilmente para el caso lineal, donde los nodos están ubicados sobre una línea recta, según se muestra en la Figura 2.3. La potencia necesaria para alcanzar una distancia d es proporcional a d^2 (el exponente 2 es válido para condiciones ideales y en escenarios reales es mayor, típicamente entre 3 y 5.). Si se disponen once nodos sobre una línea separados una distancia d formando diez tramos, la potencia necesaria será la suma de la potencia en cada transmisión, es decir proporcional a $10d^2$. En el caso que se transmite la información directamente una distancia $10d$ la potencia será $(10d)^2$ o sea $100d^2$, es decir, diez veces más que en el caso anterior.

El desempeño de la red, considerando diferentes métricas relacionadas con la transmisión de información y también con el consumo de energía, depende directamente de cómo se organice el flujo de información entre los nodos. Esto está determinado por las tecnologías de comunicación utilizadas.

Actualmente existen muchas opciones de tecnologías de comunicación para los sensores. Las aplicadas en las instalaciones piloto realizadas se describirán en la siguiente sección. En lo que resta de esta sección se describen brevemente otras tecnologías de comunicación que han ido ganando aceptación más recientemente.

Las tecnologías LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) son redes de baja potencia y largo alcance, en las que se encuentran LoRaWAN, SigFox y NB-IoT, esta última dentro de varias opciones de tecnologías celulares. Las dos primeras utilizan la banda ISM (bandas de radio industriales, científicas y médicas) de uso no licenciado (libre) bajo ciertas restricciones (por ejemplo, potencia máxima).

LoRaWAN es un protocolo de red abierto que comúnmente usa una técnica de modulación de «espectro extendido» (spread spectrum) propietaria en la banda ISM sub-GHz (concretamente en Uruguay en la banda de 915 MHz). La comunicación entre los dispositivos y la base, llamada *gateway*, es en forma de estrella pudiendo ser de varios kilómetros. Normalmente se incluyen más de un gateway para cubrir

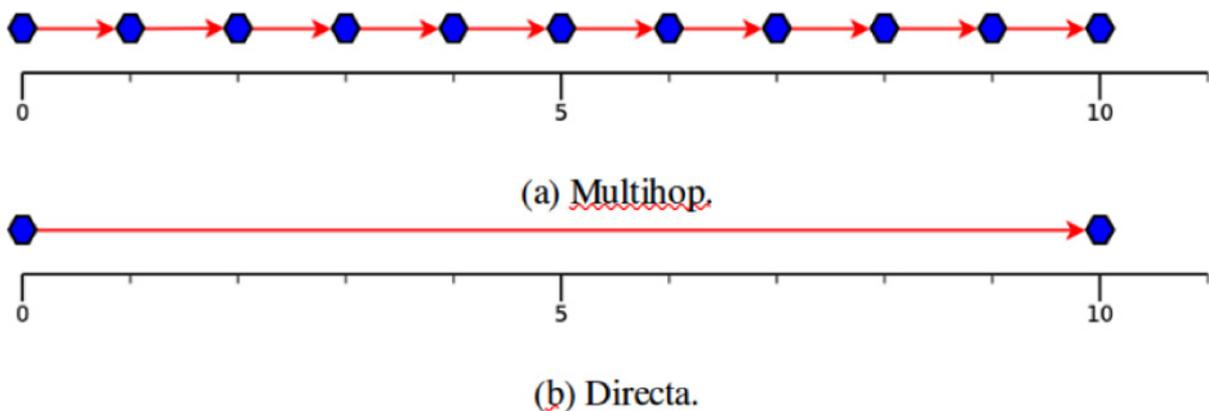


Figura 2.3. Comparación entre comunicación multihop y directa (un salto).

grandes áreas. Los mensajes de los nodos pueden ser recibidos por más de un gateway, los que reenvían los datos a un servidor de red y este al servidor de aplicaciones. Soporta comunicación desde y hacia los dispositivos, existiendo tres tipos de opciones llamadas *clases* con diferentes capacidades y consumos de energía.

La arquitectura de red de Sigfox es similar a LoRaWAN, en el sentido que los dispositivos se conectan directamente con radiobases en estrella. Sin embargo, en este caso la instalación de las radiobases es realizada por operadores locales, quienes tienen la exclusividad de la explotación en el país. Los operadores cobran por punto de conexión, modelo de negocios similar al de las compañías telefónicas. La modulación utilizada es de tipo banda ultra angosta (ultra narrow band) en la banda ISM sub-GHz. Los mensajes recibidos por las bases son reenviados al servidor Sigfox en la nube, donde se autentican los mensajes y se eliminan los duplicados, para finalmente dejarlos disponibles al cliente correspondiente. El volumen de datos que puede mandar cada dispositivo está limitado a unos 140 mensajes de 12 bytes por día. Soporta mensajes hacia los dispositivos de forma muy acotada.

Las tecnologías celulares son desarrolladas por 3GPP (3rd Generation Partnership Project) que especificaron NB-IoT (Narrow Band IoT) en el *release* 13 llamado de LTE Advanced Pro. NB-IoT utiliza un subconjunto del estándar LTE, pero limita el ancho de banda para reducir los costos de los dispositivos y su consumo. Soporta tráfico desde y hacia los dispositivos. Actualmente esta opción está siendo ofrecida por Antel.

A continuación se describe la tecnología de comunicación de red de sensores inalámbricos utilizada en el proyecto.

2.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN IEEE 802.15.4/ 6LOWPAN

Las tecnologías de comunicación de la red de sensores inalámbricas utilizada en el proyecto está definida por un conjunto de estándares definidos por la IEEE (Institute of Electrical

and Electronics Engineers) y por la IETF (Internet Engineering Task Force). A continuación se resumen los principales detalles técnicos de estos protocolos, pensando en el lector interesado y familiarizado con la temática de protocolos de sistemas de comunicación.

El estándar «IEEE Std 802.15.4», IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, define las especificaciones de la capa física y la subcapa de acceso al medio para conectividad inalámbrica a baja velocidad de datos, con requerimiento de consumo de potencia muy limitado. La primera edición del estándar «IEEE Std 802.15.4» data del año 2003, con cuatro revisiones posteriores, la actual del año 2020. Una capa física queda definida con la banda, la modulación, la cantidad y ancho de banda de canales. Las dos capas físicas en bandas ISM definidas en la primera versión continúan siendo las más utilizadas: 868/915 MHz y 2450 MHz, ambas se basan en *direct sequence spread spectrum* (DSSS). El estándar tal cual está definido puede ser utilizado en redes de comunicación, sin embargo usualmente se definen protocolos en las capas superiores.

La IETF (Internet Engineering Task Force) hace más de una década que trabaja en estandarizar capas superiores de IEEE 802.15.4, desde una capa de adaptación para poder utilizar IPv6 (última versión del protocolo usado en Internet) sobre IEEE 802.15.4 hasta capas de aplicación. El grupo de trabajo IETF 6LoWPAN (IPv6 over Low power WPAN) definió mecanismos para hacer posible que un paquete de IPv6 pueda ser transmitido sobre hardware y protocolos definidos en IEEE 802.15.4, adoptando mecanismos de compresión de encabezados (TCP/IP) y fragmentación de paquetes. La compresión se realiza omitiendo información redundante o que puede ser inferida por el transmisor y el receptor. La fragmentación y posterior reensamblado permite la transmisión de paquetes IP cuyo MTU (maximum transmission unit) es de 1280 bytes. El protocolo de ruteo RPL (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) del grupo de trabajo IETF ROLL es un protocolo proactivo basado en vector distancia en el que se construye una topología tipo árbol de manera distribuida. Soporta tráfico hacia y desde los dispositivos. Los protocolos UDP y TCP de transporte, ya definidos por la IETF para

Internet, pueden ser utilizados sobre las capas anteriores sin modificaciones. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la memoria limitada de algunos dispositivos puede restringir el uso de TCP en muchos casos. Por este motivo es que el grupo IETF CoRE (Constrained RESTful Environment) definió el protocolo CoAP (Constrained Application Protocol) como alternativa a

HTTP para la transferencia de información siguiendo un modelo RESTful, ya que HTTP utiliza servicios de TCP. En los casos donde utilizar TCP es una opción viable, se puede utilizar el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) ampliamente utilizado y estandarizado por ISO/IEC.

3. EXPERIENCIAS PILOTO

A continuación se describen los elementos desarrollados en el marco del proyecto FPTA para las instalaciones piloto.

3.1. CONCENTRADOR O BASE

El concentrador de datos es el equipo responsable de interconectar la red de sensores inalámbricos con la red de telefonía celular. Esto permite transferir los datos recolectados a un servidor remoto que luego puede ser accedido por el usuario.

El concentrador desarrollado es un equipo energéticamente autónomo, alimentado mediante un sistema fotovoltaico que consta de un panel solar, una batería y un regulador de carga. Los componentes electrónicos se encuentran protegidos por un gabinete estanco, que permite instalar el equipo a la intemperie.

Se parte de un diseño anterior, que si bien funcionaba adecuadamente y se aplicó en el proyecto FPTA SIMPA (2009-2011), tenía costos muy elevados. Se plantea un rediseño del equipo con la premisa de mantener las funcionalidades necesarias y bajar los costos de cada estación. Un diagrama de bloques del concentrador desarrollado puede verse en la Figura 3.1.

El módulo principal está compuesto por una Raspberry Pi 1 B+ (bloque 6 de la figura), que es una pequeña computadora de muy bajo costo capaz de correr un sistema operativo Linux. A esta computadora se conecta por un lado un nodo de la red de sensores inalámbricos (RSI, bloque 7) y un modem 3G (bloque 9). Estos tres componentes son los que desarrollan las funciones básicas del concentrador, permitiendo transferir datos desde la red de sensores hacia la red de telefonía celular. Para tener autonomía energética se incluye una batería (3) y un panel solar (1) que deben interconectarse mediante

un regulador de carga (2). Un convertor de voltajes (4) genera las tensiones adecuadas para alimentar la Raspberry Pi a partir del voltaje de la batería. El módulo (5) es un convertor analógico/digital que le permite a la Raspberry Pi medir el voltaje de la batería, dando así una indicación de la carga de la misma. Por último se incluyó un bloque capaz de encender y apagar el módem 3G, esto permite por un lado ahorrar energía cuando la comunicación 3G no es necesaria, y por otro le da robustez al sistema, porque si por algún motivo el módem no responde se puede apagar y reiniciar (esto sucede con cierta frecuencia en algún tipo de modems).

Todos los componentes fueron montados en un gabinete estanco para intemperie. Se construyeron tres estaciones, una para la red asociada al sistema de monitoreo de plagas basado en la adquisición inalámbrica de imágenes en trampas de insectos, otra para la red de sensores inalámbricos para el monitoreo de las condiciones microclimáticas (temperatura, humedad) y de la humedad de suelo, y un tercera como respaldo y elemento de trabajo del equipo de desarrollo. El concentrador instalado en campo puede verse en la foto de la Figura 3.2.

3.2. NODO

Se diseñaron y fabricaron dos tipos de nodos, uno para cada aplicación, descritos a continuación.

3.2.1. Detección de heladas

Los nodos sensores desarrollados para la aplicación de monitoreo microclimático de cítricos se muestran en la Figura 3.3 y están compuestos principalmente por un microcontrolador, una radio, baterías, varios sensores

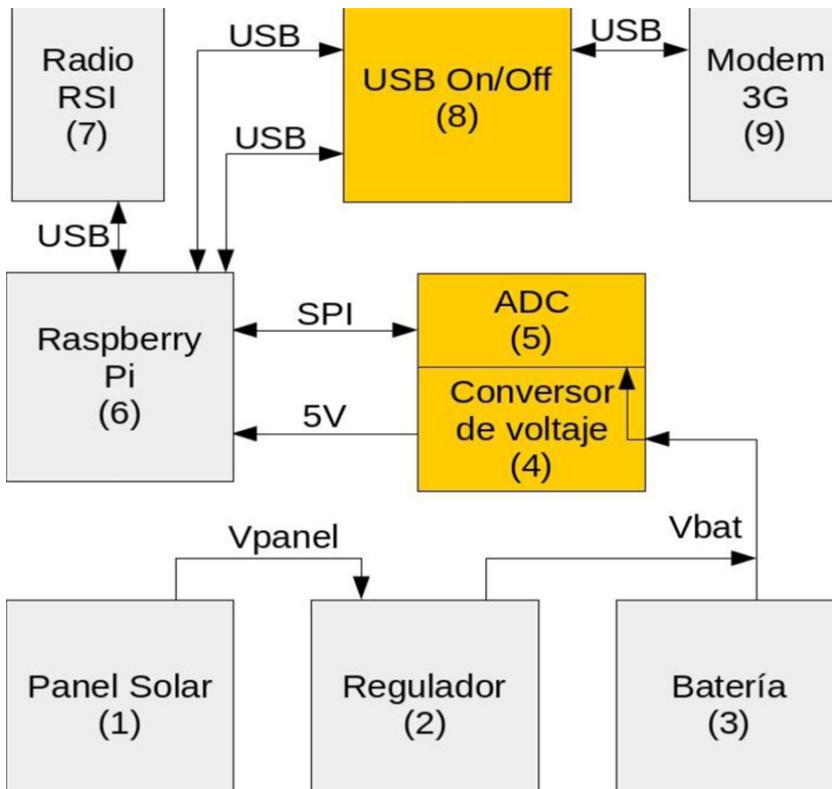


Figura 3.1. Diagrama de bloques del concentrador.



Figura 3.2. Concentrador instalado en campo en un predio cítrícola.



Figura 3.3. Nodo sensor de monitoreo microclimático. En la fotografía de la derecha, con la tapa de la caja abierta, se puede observar la electrónica (con la conexión de los sensores en la parte inferior) y las pilas.

con sus respectivos encapsulados de protección meteorológica, y un soporte para el montaje de todo el sistema. La electrónica del nodo fue diseñada en el marco del proyecto, y fabricada y ensamblada en una fábrica en el exterior.

El microcontrolador y radio utilizados en el nodo sensor están integrados en el chip CC2538 de Texas Instruments, que está compuesto de un microprocesador ARM Cortex-M3 y una radio compatible con el estándar IEEE 802.15.4. Para la alimentación del sistema se utilizaron dos pilas AA de 1,5V, lo cual le da al sistema una autonomía aproximada de 6 meses. Los sensores utilizados para medir la temperatura y humedad del aire fueron los SHT-21 de Sensirion, que presentan una precisión de ± 2 %RH para la humedad y $\pm 0,3$ °C para la temperatura. La humedad del suelo fue medida con sensores EC-05 de Decagon, que miden contenido volumétrico de agua con una precisión de ± 1 -2% VWC, y una resolución de 0,25% VWC en el peor caso. Finalmente, para medir la temperatura del suelo se utilizaron los sensores TMP-

275 de Texas Instruments que presentan una precisión de $\pm 0,5$ °C entre -20 °C y 100 °C.

Para los sensores de SHT-21 y TMP-275 se diseñaron y fabricaron protecciones mecánicas y circuitos impresos para su montaje. Para el sensor TMP-275 se diseñó una protección basada en un tubo de acero inoxidable, mientras que el sensor SHT-21 va instalado en la protección meteorológica. La conexión de todos los sensores a la placa del microcontrolador es realizada utilizando conectores 3,5 mm (plug) y los cables son conducidos por dentro de caños galvanizados.

La programación se realizó utilizando la plataforma de software ContikiOS que incluye un sistema operativo de pequeño porte adecuado para los microcontroladores utilizados e implementaciones de los protocolos seleccionados.

La instalación física e integración de las partes constitutivas del nodo sensor fueron diseñadas teniendo en cuenta las condiciones de instalación en campo. La Figura 3.4 muestra el detalle de piezas, incluyendo la protección meteorológica, la sujeción de la caja con la

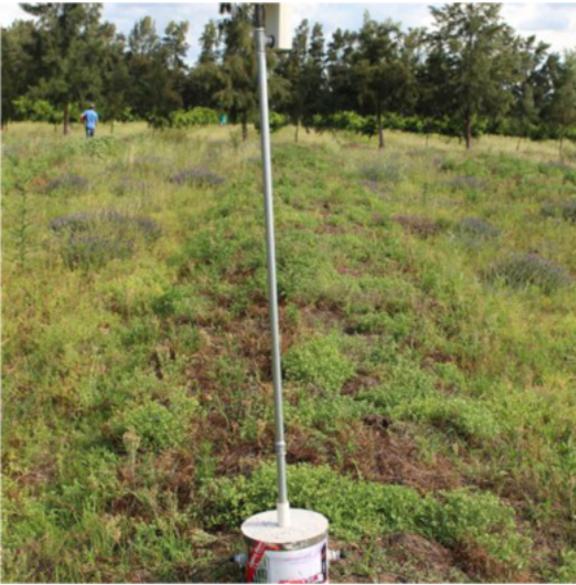


Figura 3.4. Nudo sensor de monitoreo microclimático completo, antes de ser instalado, donde se puede apreciar el soporte y la base.

electrónica, el soporte, y la base de hormigón. La protección meteorológica diseñada en el marco del proyecto puede fabricarse en Uruguay con proveedores y material disponible en plaza. También los caños para la construcción

del soporte ya que son en acero galvanizado y la tornillería asociada. Solamente la caja para la electrónica es de procedencia extranjera.

3.2.2. Detección de plagas

El nodo tiene en común componentes con el nodo utilizado para cítricos y agrega: i) una cámara fotográfica (Linksprite LS-Y201-2MP, con lente LS-20150), ii) Iluminación (LEDs blancos de alto brillo) y se alimenta de tres pilas alcalinas AA para alimentación. Se muestra en la Figura 3.5 un diagrama de bloques del nodo para detección de plagas y en la Figura 3.6 una fotografía del nodo construido.

Inicialmente se trató de mantener el diseño original de la trampa comúnmente usada, modelo «wing», para no modificar el piso y ni la abertura para los insectos. Sin embargo, las restricciones para ubicar la cámara sobre la trampa y limitaciones del lente para realizar un correcto enfoque llevó a buscar soluciones alternativas. Se construyó un primer prototipo de trampa modificada elaborado en acrílico, mostrado en la Figura 3.7. El modelo fue validado por el personal de Jumecal y por simulaciones

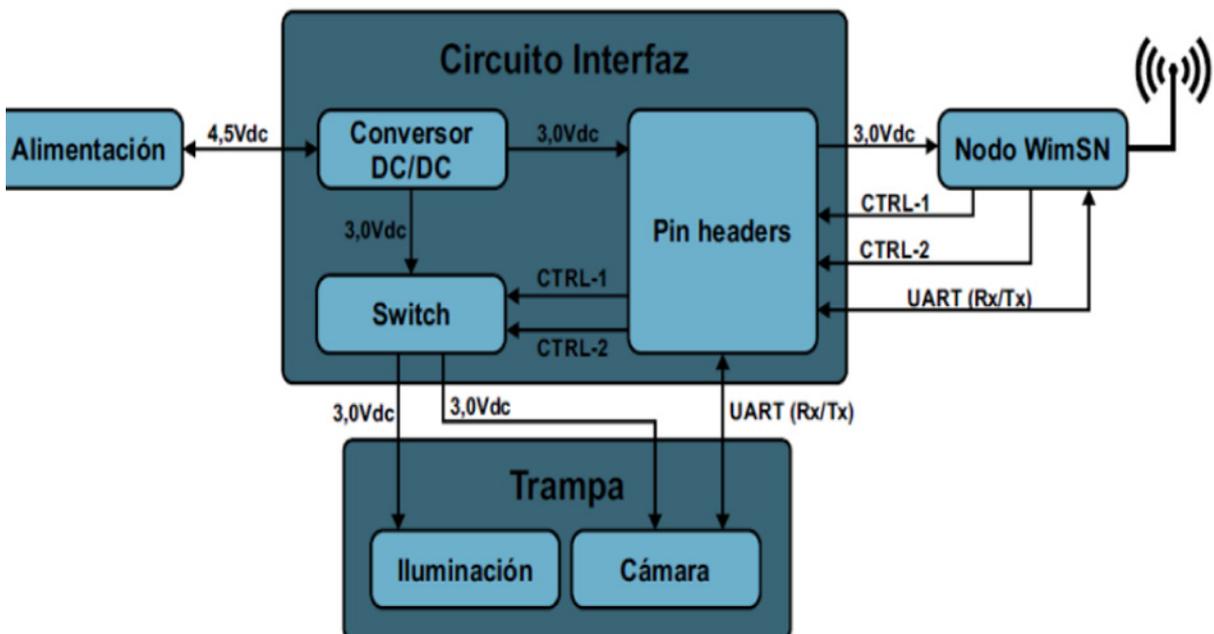


Figura 3.5. Diagrama de bloque funcional del nodo para detección de plagas. La fuente de alimentación consiste en 3 pilas alcalinas AA.

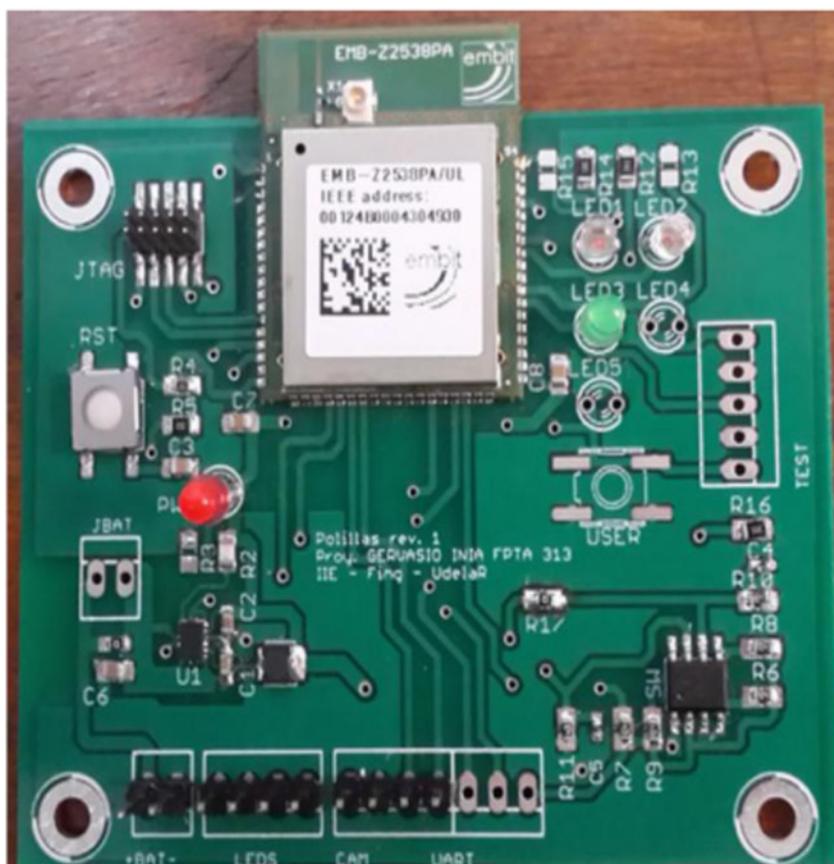
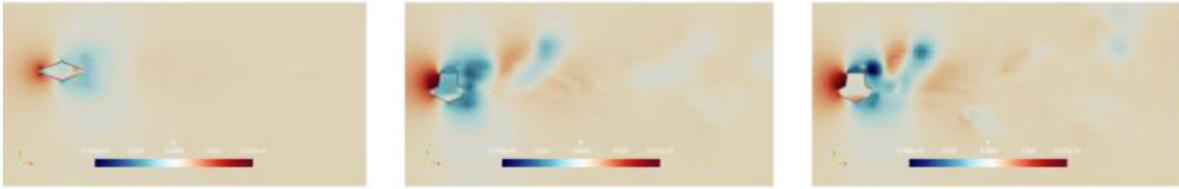


Figura 3.6. Fotografía del nodo construido para la detección de plagas (no se muestra la cámara ni los demás componentes instalados en la trampa).

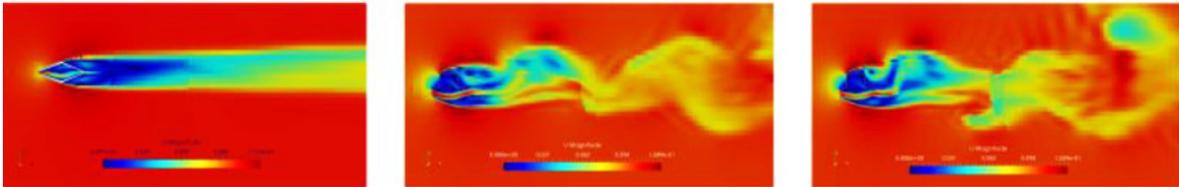


Figura 3.7. Fotografía de la trampa implementada en acrílico y entregada a Jumecal para evaluación. En la parte superior, en el interior de la trampa, se ubica el sistema de adquisición de imágenes.

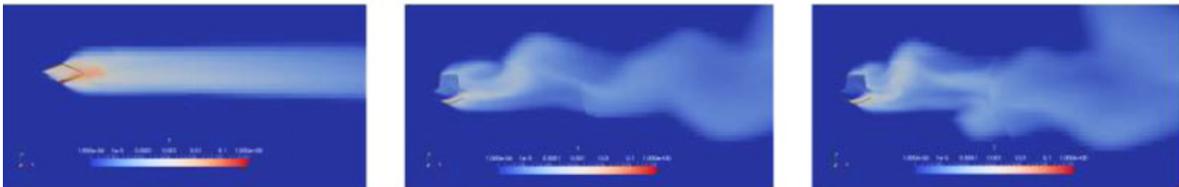
Pressure:



Velocity:



Pheromone:



Streamlines:

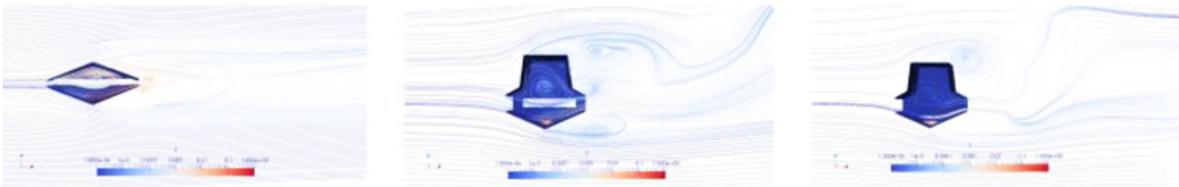


Figura 3.8. Simulaciones numéricas del movimiento del aire y dispersión de las feromonas de las trampas comerciales modelos Wing y la trampa propuesta. Figura tomada de (von Römer, 2016).

numéricas que verificaron que el flujo de aire a través de la misma es similar a las del modelo wing (ver Figura 3.8).

La trampa incluye ocho LEDs que se encienden al tomar la fotografía del piso (apuntan hacia el techo de la trampa desde adentro de modo de difuminar la iluminación). La altura de la cámara al piso es de 20,5 cm.

En la Figura 3.9 se muestra la última versión, construida en cartonplast. Esta trampa mantiene las características de la versión anterior pero logrando una reducción importante de costos. El costo aproximado de materiales para la construcción de la trampa, en bajos volúmenes de producción, es de \$U1000+IVA. La trampa puede ser armada manualmente por un operario de



Figura 3.9. Fotografía de la última versión de la trampa construida en cartonplast.

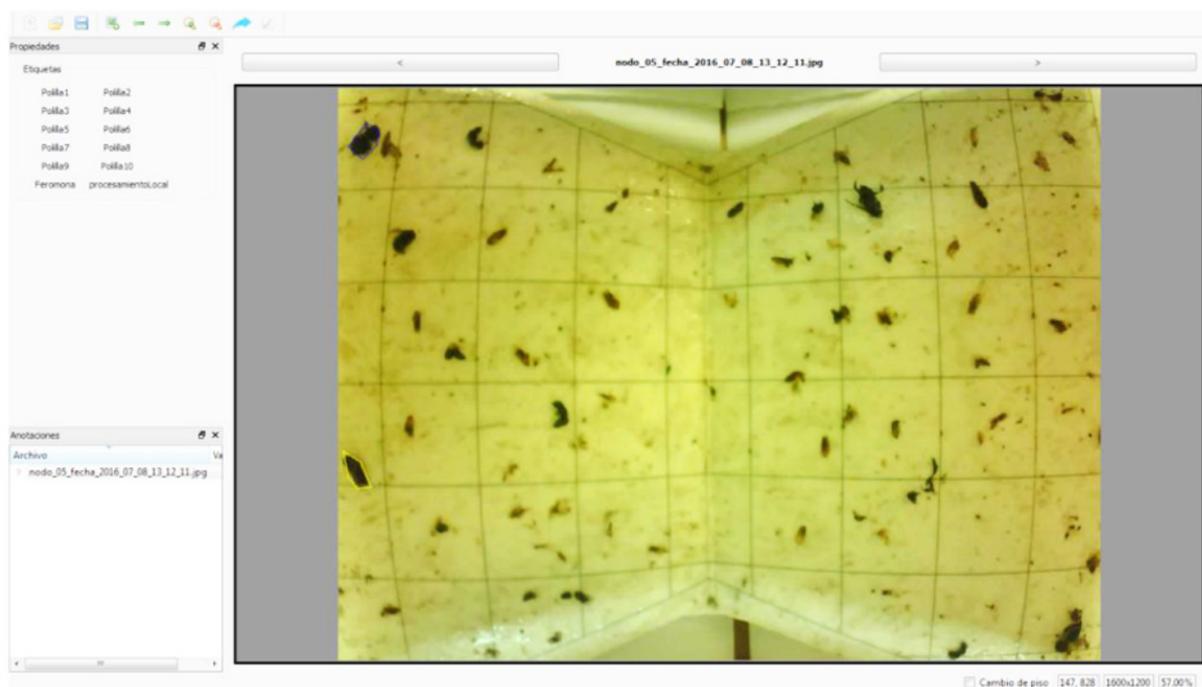


Figura 3.10. Software de usuario y marcado de un insecto en la parte inferior izquierda de la imagen.

taller o agricultor porque se construye por partes. Se mantiene la filosofía de que puedan ser armadas localmente en Jumecal sin recurrir a terceros.

Se desarrolló un software de usuario para visualización, marcado y anotación en las imágenes. En la Figura 3.10 se muestra la interfaz de usuario de dicho software. Este software fue probado por técnicos de Jumecal. Esto permite mantener un rápido seguimiento de la evolución de cada trampa. El marcado de polillas en las imágenes permite a su vez la generación paulatina de una base de datos que hará posible luego entrenar métodos de detección automática de los insectos. Una vez validada esta detección automática podría posteriormente realizarse directamente en los nodos de la red con la consiguiente reducción de tráfico al no tener que transmitir imágenes sobre la red.

Además, el software permite la selección de una polilla en una imagen y automáticamente realizar el marcado de la misma en las imágenes

posteriores del mismo nodo. Esto simplifica el trabajo de marcado de polillas y contenedor de feromona por parte del usuario, debiendo identificar solamente los cambios en las imágenes posteriores. En caso de cambiarse la hoja adhesiva de la trampa es posible borrar las polillas ya seleccionadas utilizando la opción de «cambio de piso» en la parte inferior derecha del programa. Se muestran a continuación imágenes del mismo nodo. Los insectos fueron agregados artificialmente sobre el piso de la trampa. La «polilla 1» (parte media inferior de la imagen, contorno en azul) es seleccionada en la primera imagen (Fig. 3.11) y luego automáticamente esta selección es mantenida por el software en la segunda imagen (Fig. 3.12). La polilla ya seleccionada se muestra con contorno en rojo y una nueva, seleccionada sobre el lado superior izquierdo, se muestra con contorno en amarillo.

Finalmente la Figura 3.13 muestra otra imagen con varios elementos marcados

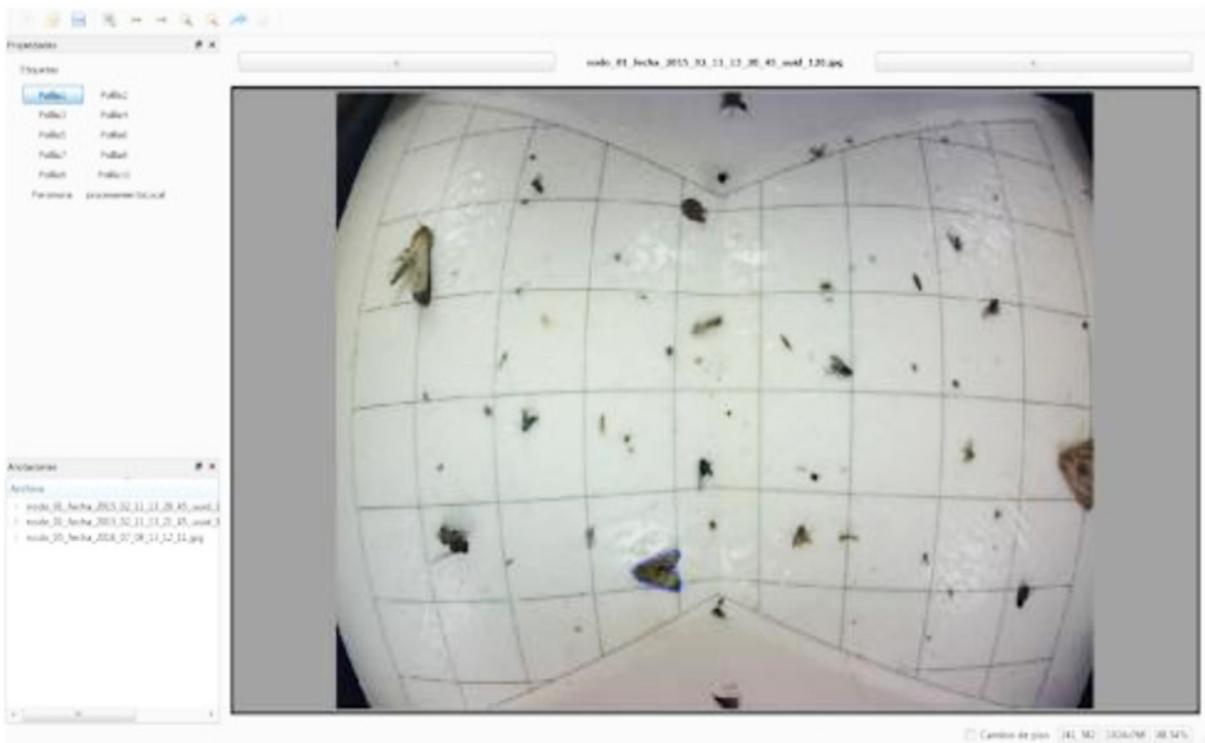


Figure 3.11. Marcado (borde azul) de un insecto en la parte inferior media de la imagen.

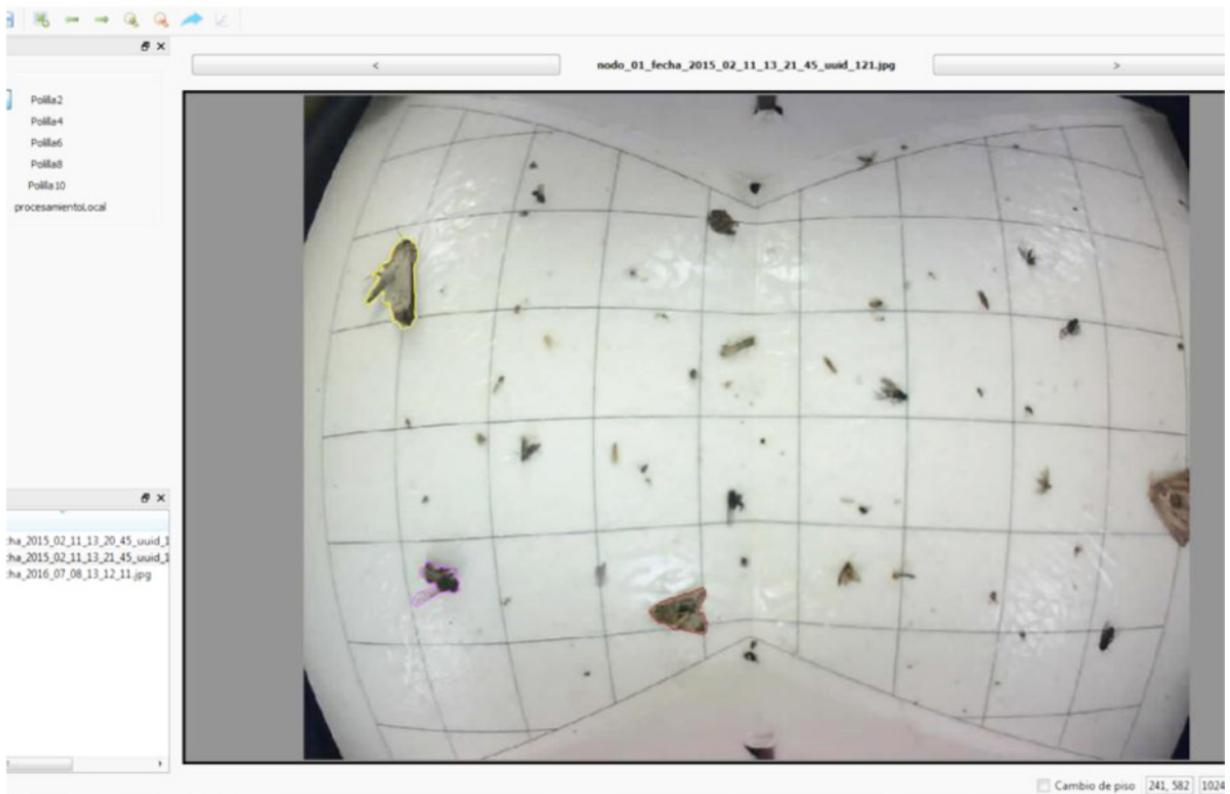


Figure 3.12. Se mantiene marcado el insecto de la Figura 3.11 en la imagen siguiente del mismo nodo (ahora con borde rojo) y se agrega el marcado de un insecto en la parte superior izquierda de la imagen (con borde amarillo).

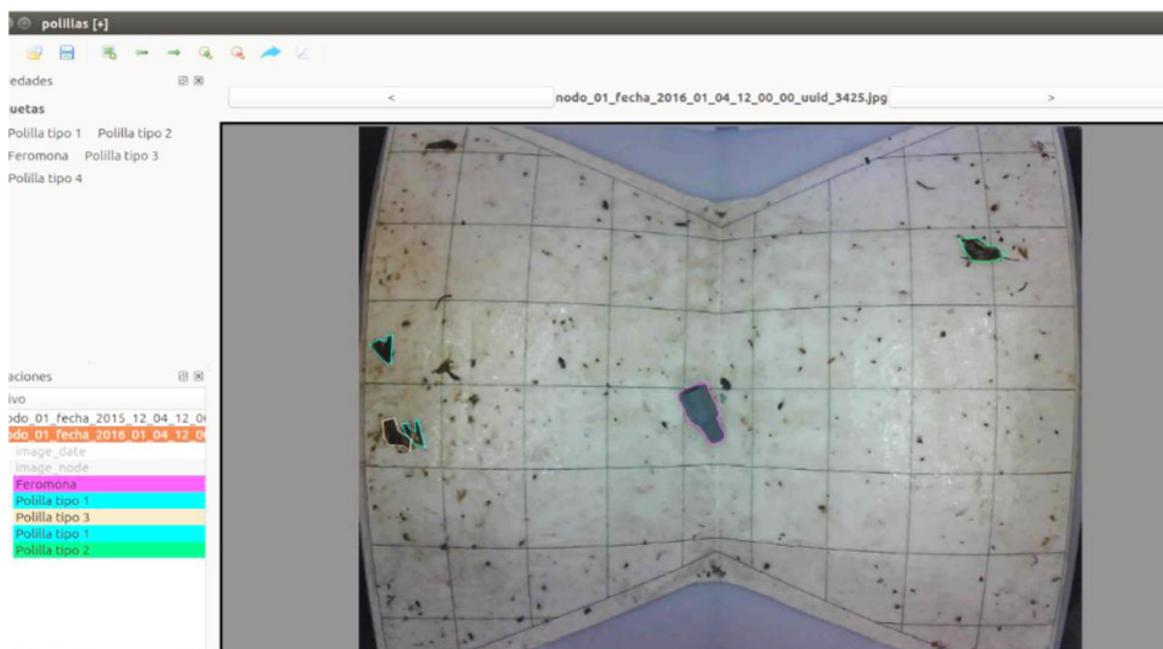


Figure 3.13. Interfaz de software de usuario mostrando varios elementos marcados.

3.3. INSTALACIONES PILOTO

3.3.1. Detección de heladas

Se instaló un piloto de la red en un predio citrícola vinculado a Urud'Or en la localidad de Margat, Canelones. En la Figura 3.14 se indica

la ubicación de los nodos en los cuadros de producción. El punto indicado como G refiere a la ubicación del “gateway”, base o concentrador que brinda conexión a Internet.

Todos los nodos miden temperatura, humedad del aire, temperatura y humedad de suelo.



Figura 3.14. Ubicación de los nodos de la red instalados en el predio considerado en Margat Canelones.

La aplicación de software permite la gestión de la red de sensores. El sistema está compuesto por tres componentes: i) servidor de web, ii) servidor de aplicación, iii) *daemon* («demonio», programa residente ejecutado en segundo plano para comunicación con la red de sensores). La arquitectura modular del sistema permite la instalación distribuida de cada uno de los componentes. Sin embargo, el *daemon* siempre va instalado en el concentrador de datos conectado al nodo raíz (root) de la red de sensores que actúa como border-router, reenviando los datos a Internet. El servidor de aplicación se comunica con el *daemon* para la configuración de la red y obtención de la información de monitoreo.

La instalación y pruebas iniciales de la red permitieron: 1) detectar aspectos a modificar para mejorar la robustez de la operación de la red y 2) confirmar la correcta comunicación de los nodos en el predio (si bien los nodos más alejados, además ubicados en zonas de menor altura topográfica y con varias barreras de pinos en su camino, debieron ser reubicados para una mejor comunicación).

La Figura 3.15 muestra un ejemplo de datos recogidos.

Los costos a la fecha de finalización del proyecto (2017), considerando la fabricación de unas decenas de unidades (acordes a un pro-

yecto de investigación), fueron aproximadamente los siguientes: nodo de aplicación cítricos con montaje y sensores: US\$ 300 (costo CIP, sin costos de importación). Cabe resaltar que aproximadamente el 40% de este costo corresponde al sensor de humedad de suelos comercial utilizado. El costo de la base, a utilizar una por predio: US\$ 580 (costo plaza IVA incluido). Estos costos podrían reducirse significativamente por el tiempo transcurrido y produciendo en volúmenes altos (cientos o miles de unidades en el caso de los nodos).

3.3.2. Detección de plagas

Se instalaron cuatro nodos, los cuales fueron configurados para realizar un envío de imagen cada 12 horas. La topología de la red probada se muestra en la Figura 3.16. En estas pruebas iniciales se verificó el funcionamiento de la red y la toma de imágenes por lo que las trampas no tenían piso engomado ni dispositivo con feromonas. Posteriormente se realizaron pruebas completas con capturas de grafolita. Un desafío técnico de esta red es que la información a transmitir (imagen) es mucho mayor que en la otra aplicación. Ello requiere contemplar mayores tiempos para transferirla y la posibilidad de tener que retransmitir sólo una parte. El tiempo disponible en cada nodo para enviar la imagen adquirida fue

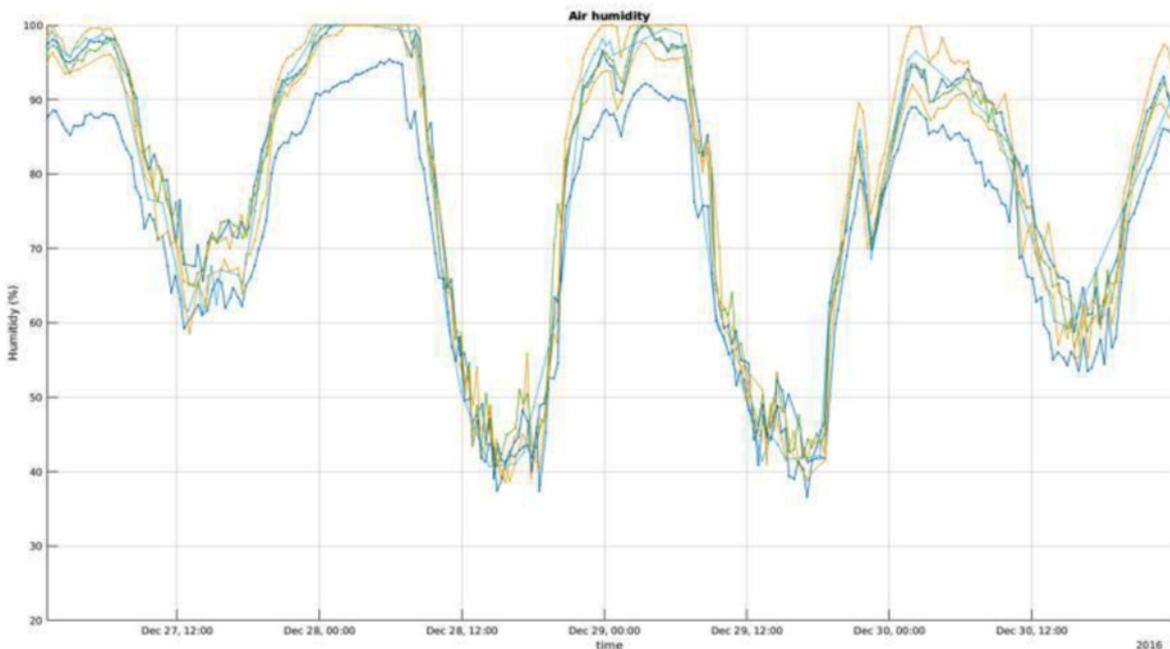


Figura 3.15. Ejemplo de datos recabados de humedad de aire.



Nodo	Coordenadas
1	DD -34.75829, -56.30632
2	DD -34.75803, -56.30689
3	DD -34.75748, -56.30625
4	DD -34.75650, -56.30472

Figura 3.16. Ubicación de los nodos de la red instalada en predio cultivado: nodos con trampas (n1, n2, n3), nodo n4 repetidor y nodo receptor (server en la sede de Jumecal). Se incluyen las coordenadas de los nodos.

configurado en 50 minutos. Si luego de este tiempo no se logra transmitir una imagen entera, el nodo inicia un nuevo intento de ciclo de envío desde el fragmento de imagen en donde hubiera perdido comunicación.

En la Figura 3.17 se muestra una fotografía de las trampas, en su diseño final de bajo costo en cartonplast, instalada en los árboles.

Los costos fueron aproximadamente los siguientes (teniendo en cuenta las consideraciones anteriores para la detección de heladas): trampa con electrónica: US\$ 120 (costo CIP, sin costo de importación). El costo de la base, a utilizar una por predio, es igual al costo de la base para la detección de heladas, ya que tienen las mismas características (US\$ 580, costo plaza IVA incluido).



Figura 3.17. Trampa de cartonplast colocada en el árbol

4. CONCLUSIONES

Este documento presentó los principales conceptos de las redes de sensores inalámbricos aplicados a la producción agrícola. Se ejemplifica con algunos de los resultados obtenidos a través de los dos pilotos realizados que fueron liderados desde el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

En estos proyectos se diseñó hardware y envió a fabricar al exterior, realizando el ensamblado final en el país, y se desarrolló software para dos aplicaciones: monitoreo microclimático en plantaciones de cítricos y trampas para grafolita equipadas con adquisición y transmisión automática de imágenes. El desarrollo incluyó los nodos de la red de sensores inalámbricos para ambas aplicaciones, software de usuario y optimización del diseño de un concentrador de datos apto para funcionamiento autónomo a la intemperie que envía los datos adquiridos a un servidor accesible por Internet.

Los resultados obtenidos, pensamos, muestran la oportunidad de aprovechar a nivel nacional estas nuevas tecnologías en la producción agrícola a través del trabajo conjunto de especialistas en estas tecnologías, especialistas en producción agrícola en sus diferentes variantes y productores.

Las redes de sensores inalámbricos y la IoT en general han tenido en los últimos años un gran desarrollo académico y comercial a nivel mundial. Sin embargo, a pesar de los avances registrados, la investigación en redes de sensores inalámbricos tiene aún una serie de desafíos para poder continuar incrementando el poder de las redes y la cantidad de información recolectada y procesada con un bajo costo de recursos y con un consumo limitado de energía. Esto es especialmente importante en el caso de la agricultura donde se deben desplegar

redes que abarquen amplias extensiones y para las cuales la mayor parte de los nodos no cuentan con un suministro de energía externo. Para el manejo eficiente de la energía en las redes se estudian en la actualidad en la comunidad del área temas como técnicas de ruteo eficiente, agregación de datos, cosecha de energía y antenas direccionales por mencionar sólo algunos. La investigación en esta serie de temas requiere la integración de conocimiento de otras fuentes como el aprendizaje automático y la inteligencia artificial.

El ruteo de la información sobre las redes busca hacer llegar los datos de la forma más eficiente desde los nodos hasta el nodo raíz o sumidero. Un relevamiento de métodos de ruteo son presentados por Shafiq et al. (2020).

La agregación de datos es uno de los métodos usados en IoT para reducir el número de transmisiones en la red y en definitiva reducir el consumo de energía y aumentar la vida útil de la red. En este método, algunos nodos tienen la capacidad de almacenar la información generada en el propio nodo y la información recibida de otros nodos por un período de tiempo, organizar la información, eventualmente resumirla y transmitirla al nodo raíz por el camino más adecuado. Con esto se reduce la redundancia de la información transmitida sobre la red mejorando el tráfico y conservando los recursos y la energía. Las distintas estrategias y arquitecturas para implementar la agregación son analizadas por Pourghebleh y Navimipour (2017), Khan y Chishti (2020) y Dehkordi et al. (2020).

La capacidad de la batería en los nodos de la red limita la vida útil de las redes de sensores por lo que es necesario minimizar por distintos mecanismos el consumo de energía como los vistos más arriba.

A pesar de mejorar la eficiencia, la capacidad limitada implica la necesidad de reponer baterías periódicamente lo que tiene un costo operativo y puede resultar complicado en ciertas aplicaciones dada la ubicación de los nodos. La cosecha de energía es una alternativa en estos casos donde se busca obtener un flujo continuo de energía tomándola del ambiente (Sah, 2020; Ouldzira, 2019) que sumado a consideraciones medioambientales ineludibles serán considerados en proyectos futuros.

La transmisión por radio de la información entre los nodos consume la mayor parte de la energía de los nodos de una red. Una forma de minimizar el consumo en un nodo al momento de transmitir es direccionar la energía de radiofrecuencia hacia el nodo receptor que determine el ruteo en ese momento. Cuando un nodo debe comunicarse con más de un nodo, es necesario desarrollar antenas que permitan conformar un perfil de radiación direccional y variable lo cual es tema de investigación vigente (George, 2019; Schandy, 2019a Schandy, 2019b).

Las técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial han comenzado a utilizarse cada vez en más aspectos en las redes de sensores inalámbricos en los últimos años. Estos métodos son aplicados tanto para el análisis previo al despliegue de una red (estudio de la cantidad y distribución de nodos, predicción de consumos de energía por ejemplo) como durante el funcionamiento (detección de fallas, ruteo dinámico, reducción de la dimensionalidad de la información en el nodo, entre otros). Un panorama de métodos de aprendizaje automático aplicado a redes de sensores inalámbricos

puede encontrarse en (Kumar, 2019). Las técnicas más actuales de aprendizaje profundo y su aplicación general a redes inalámbricas son reseñadas por Zhang et al. (2019). Muchos de los métodos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo se aplican en la actualidad a la agricultura de precisión en general (Sharma, 2020) y en particular a las aplicaciones con redes de sensores inalámbricos (Meconnen, 2019).

Todos estos desafíos vigentes en el área hacen que la investigación y desarrollo de las tecnologías de comunicación utilizadas en las redes de sensores inalámbricos y su disponibilidad comercial estén en permanente expansión. Para ejemplificar esto es suficiente mencionar que NB-IoT, de tecnología celular, no estaba disponible incluso al momento de finalizar el presente proyecto y actualmente lo está. En consecuencia es necesario evaluar cuidadosamente las diferentes opciones disponibles, para lo que se requiere de un conocimiento profundo y detallado de las tecnologías y sus fundamentos, para seleccionar las más adecuadas en los diferentes casos particulares. Esto implica tener a nivel nacional un conjunto de técnicos e investigadores con firmes conocimientos en el área. Los proyectos descritos en este trabajo han contribuido a fortalecer ese núcleo de técnicos e investigadores y ha permitido el necesario relacionamiento interdisciplinario entre los distintos actores de la agricultura de precisión. Esto constituye la base fundamental para impulsar la investigación y desarrollo en esta área tan necesaria para la producción primaria nacional.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS CITADAS

- IEEE Standard Association. «IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks», in *IEEE Std 802.15.4-2015* (2020): 1-800.
- Dehkordi, Soroush Abbasian, Kamran, Farajzadeh, Javad, Rezazadeh, Reza, Farahbakhsh, Kumbesan, Sandrasegaran, and Masih Abbasian, Dehkordi. «A survey on data aggregation techniques in IoT sensor networks». *Wireless Networks* 26, no.2 (2020): 1243–1263.
- George, Robin, and Thomas Anita Jones Mary. «Review on directional antenna for wireless sensor network applications.» *IET Communications* 14, no. 5 (2019): 715-722.
- Holler, Mark. «High density, multiple depth, wireless soil moisture tension measurements for irrigation management.» *White paper: Crossbow Inc* (2008): 1-8.
- Kalma, Jetse D., Gregory P. Laughlin, Joseph M. Caprio, and Paul JC Hamer. «The occurrence of frost: types, distribution and prediction.» In *The Bioclimatology of Frost*, pp. 5-12. Springer, Berlin, Heidelberg, 1992.
- Khan, Ab Rouf, and Mohammad Ahsan, Chishti. «Data aggregation mechanisms in the internet of things: a study, qualitative and quantitative analysis.» *International Journal of Computing and Digital Systems* 9, no.2 (2020): 289–297.
- Kumar, D. Praveen, Tarachand Amgoth, and Chandra Sekhara Rao Annavarapu. «Machine learning algorithms for wireless sensor networks: A survey.» *Information Fusion* 49 (2019): 1-2.
- Mekonnen, Yemeserach, Srikanth Namuduri, Lamar Burton, Arif Sarwat, and Shekhar Bhansali. «Machine learning techniques in wireless sensor network based precision agriculture.» *Journal of the Electrochemical Society* 167, no. 3 (2019): 037522.
- Molin, José Paulo, Lucas Rios do Amaral, and André Colaço. *Agricultura de precisão*. Oficina de textos, 2015.
- Ouldzira, Hicham, Hajar Lagraini, and Ahmed Mouhsen. «A Survey on RF Energy Harvesting-RFEH-in WSNs.» In *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés*. 2019.
- Pascale, Antonio J., and Edmundo A. Damario. *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. No. 630.2515. Editorial Facultad de Agronomía, UBA., 2004.
- Pourghebleh, Behrouz, and Nima Jafari, Navimipour. «Data aggregation mechanisms in the Internet of things: A systematic review of the literature and recommendations for future research.» *Journal of Network and Computer Applications* 97 (2017): 23–34.
- Sah, Dipak K, and Tarachand, Amgoth. «Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: a survey.» *Information Fusion* 63 (2020): 223–247.
- Schandy, Javier, Olofsson, Simon, Steinfeld, Leonardo, & Voigt, Thiemo (2019, March). Improving Sensor Network Convergecast Performance with Directional Antennas. In *EWSN* (pp. 13-22).
- Schandy, Javier, Steinfeld, Leonardo, Rodríguez, Beningno, González, Juan Pablo, & Silveira, Fernando. (2019). Enhancing parasitic interference directional antennas with multiple director elements. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019.
- Shafiq, Maryam, Humaira, Ashraf, Ata, Ullah, and Shireen, Tahira. «Systematic Literature Review on Energy Efficient Routing Schemes in WSN–A Survey.» *Mobile Networks and Applications* (2020): 1–14.
- Sharma, Abhinav, Arpit Jain, Prateek Gupta, and Vinay Chowdary. «Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review.» *IEEE Access* (2020).
- Slaughter, D. C., D. M. Obenland, J. F. Thompson, M. L. Arpaia, and D. A. Margosan. «Non-destructive freeze damage detection in oranges using machine vision and ultraviolet fluorescence.» *Postharvest Biology and Technology* 48, no. 3 (2008): 341-346.
- Snyder, Richard L., J. P. Melo-Abreu, Scott Matulich, Josep M. Villar-Mir, and José Millán. «Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Volume 2.» *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía 2* (2010): 1-80.
- von Römer, L. M. , «Evaluation of the design of a new insect trap using CFD», Master Thesis Physical Engineering (Advisor: Juan J. P. Fernandez, Supervisor: Prof. G. Usera) Prof. Sesterhenn. Universidad de la República, Technische Universität Berlin.
- Zhang, Chaoyun, Paul Patras, and Hamed Haddadi. «Deep learning in mobile and wireless networking: A survey.» *IEEE Communications surveys & tutorials* 21, no. 3 (2019): 2224-2287.

PUBLICACIONES DERIVADAS DEL PROYECTO

Dpto de Electrónica, Dpto de Procesamiento de Señales. «Development of a wireless sensor network system for the monitoring of insect pests in fruit crops». In *Proceedings of the First International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture*, September 27-29 2017, Montevideo, Uruguay, page 87-89.

Gonzalez, Mauricio, Schandy, Javier, Wainstein, Nicolás, Barboni, Leonardo, Gómez, Alvaro and Croce, Carlos. «Wireless image-sensor network application for population monitoring of lepidopterous insects pest (moths) in fruit crops.» In *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, pp. 1394-1398. IEEE, 2014.

Gonzalez, Mauricio, Schandy, Javier, Wainstein, Nicolás, Bertrán, Martín, Martínez, Natalia, Barboni, Leonardo and Gómez, Alvaro. «A Wireless Sensor Network Application with Distributed Processing in the Compressed Domain.» . In *International Workshop on Activity Monitoring by Multiple Distributed Sensing* (pp. 104–115).2014.

Sosa, Raquel, Vera, Andrés, Ibarburu, Maite, Steinfeld, Leonardo, Schandy, Javier, Silveira, Fernando. «Sensor data analysis and sensor management for crop monitoring. « Trabajo presentado en I International Conference on Agro BigData and Decision Support Systems in Agriculture, (BigDSSAgro 2017), Montevideo, Uruguay, 27-29 sep.

Steinfeld, Leonardo, Schandy, Javier, Favaro, Federico, Alcarraz, Andrés, Oliver, Juan, Silveira, Fernando. «Design of a low power wireless sensor network platform for monitoring in citrus production. « Trabajo presentado en I International Conference on Agro BigData and Decision Support Systems in Agriculture, (BigDSSAgro 2017), Montevideo, Uruguay, 27-29 sep.

TESIS DE GRADO DIRECTAMENTE RELACIONADAS CON EL PROYECTO

Abadie, Ignacio, Martínez, Mauro, Vignone, Aldo. «AGROVISIÓN : Red de sensores inalámbricos para la previsión y tratamiento de plagas en cultivos frutales. «Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2016.

Arbio, Florencia, López, Federico, Pereyra, Miguel. «WSNvision. «Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.. 2015.

Cardozo, Cecilia, Camps, Ignacio, Driedger, Martín. «RSItrust : red de sensores inalámbricos para monitoreo de condiciones microclimáticas en cultivos cítricos. «Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería Eléctrica. 2015.

Schandy, Javier, González, Mauricio, Wainstein, Nicolás. «Plagavisión : desarrollo de un prototipo de nodo WSN con capacidad visual para la detección temprana de plagas. «Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2014.

PUBLICACIONES PROPIAS RELACIONADAS CON EL PROYECTO

Aguerre, Francisco, González, María, Rodríguez, Ismael. «DIAMETRONCO. Desarrollo de un dendrómetro prototipo para su aplicación en redes de sensores inalámbricos. «Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2013.

Contreras, Andry, Benigno Rodríguez, Leonardo Steinfeld, Javier Schandy, and Mariana Siniscalchi. «Design of a Rectenna for Energy Harvesting on Wi-Fi at 2.45 GHz.» In *2020 Argentine Conference on Electronics (CAE)*, pp. 63-68. IEEE, 2020.

Contreras, Andry, Steinfeld, Leonardo, Siniscalchi, Mariana, Schandy, Javier, Rodríguez Díaz, Benigno. «A rectenna as energy source for wireless sensor nodes. « IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), San Jose, Costa Rica, 25-28 feb, 2020. pp. 1-4.. (2020.):4 p.

Gammarano, Nicolás, Javier Schandy, and Leonardo Steinfeld. «Reducing neighbor discovery time in sensor networks with directional antennas using dynamic contention resolution.» *Design automation for embedded systems* 24, no. 4 (2020): 223-247.

Gammarano, Nicolás, Schandy, Javier, Steinfeld, Leonardo. «DANDi : Dynamic Asynchronous Neighbor Discovery protocol for directional antennas. « Trabajo presentado en 2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC), Salvador, Brazil, 5-8 nov, p. 16—23.

Gammarano, Nicolás, Schandy, Javier, Steinfeld, Leonardo. «Q-SAND: A quick neighbor discovery protocol for wireless networks with sectorized antennas. « Trabajo presentado en 2018 Ninth Argentine Symposium and Conference on Embedded Systems (CASE), Córdoba, Argentina, 15-17 aug., pp. 19-24..

- Modernell Echenique, Pablo. «Plataforma de pruebas de conformidad LoRaWAN». «Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2020.
- Rodríguez Díaz, B, González, J, Steinfeld, L, Schandy, J y Silveira, F. (2018.). *Antenna characterization without using anechoic chambers or TEM cells*. EN: 10th Latin America Networking Conference, LANC 2018, Sao Paulo, Brazil, 3-4 oct., pp. 97-101.. 5 p.
- Rodríguez, Benigno, Javier Schandy, Juan P. González, Leonardo Steinfeld, and Fernando Silveira. «Fabrication and characterization of a directional SPIDA antenna for wireless sensor networks.» In *2017 IEEE URUCON*, pp. 1-4. IEEE, 2017.
- Schandy, Javier, Olofsson, Simon, Steinfeld, Leonardo, & Voigt, Thiemo (2019, March). Improving Sensor Network Convergecast Performance with Directional Antennas. In *EWSN* (pp. 13-22).
- Schandy, Javier, Steinfeld, Leonardo, Rodríguez, Benigno, González, Juan Pablo, & Silveira, Fernando. (2019). Enhancing parasitic interference directional antennas with multiple director elements. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019.
- Schandy, Javier. «Improving the performance of wireless sensor networks using directional antennas». «Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2020.
- Steinfeld, Leonardo. «Energy-efficient memories for wireless sensor networks». «Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. 2013.

INIA Dirección Nacional
Avenida Italia 6201,
Ed. Los Guayabos,
Parque Tecnológico LATU.
Montevideo
Tel.: 2605 6021
inia@inia.org.uy

INIA La Estanzuela
Ruta 50, Km 11
Colonia
Tel.: 598 4574 8000
Fax: 598 4574 8012
iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas
Ruta 48, Km 10
Canelones
Tel.: 598 2367 7641
Fax: 598 2367 7609
inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande
Camino al Terrible
Salto
Tel.: 598 4733 5156
Fax: 598 4732 9624
inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó
Ruta 5, Km 386
Tacuarembó
Tel.: 598 4632 2407
Fax: 598 4632 3969
iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres
Ruta 8, Km 281
Treinta y Tres
Tel.: 598 4452 2023
Fax: 598 4452 5701
iniatt@tyt.inia.org.uy

www.inia.uy