

Una solución IoT de bajo costo para la predicción de enfermedades foliares en cultivos agroecológicos a escala agricultura familiar. Experiencia en el periurbano platense

Néstor Castro¹[0009-0006-2621-2601], Claudia Queiruga¹[0009-0004-1612-4902], Matías Pagano¹[0009-0002-2011-6601], Agustín Candia¹[0009-0008-9407-4647], Enrique Goites²[0000-0002-7216-7489], Javier Díaz¹[0000-0002-4225-3829]

¹LINTI - Facultad de Informática UNLP (Universidad Nacional de La Plata) La Plata, Argentina

²INTA-IPAF Región Pampeana, Argentina
ncastro, claudiaq@info.unlp.edu.ar, matiasp, acandia@linti.unlp.edu.ar,
goites.enrique@inta.gob.ar, jdiaz@unlp.edu.ar

Resumen. Este trabajo se enmarca en dos proyectos: el primero, un proyecto de I+D+i titulado 'Predicción automática de enfermedades foliares en cultivos de hoja producidos en invernaderos bajo manejo agroecológico', desarrollado por el Laboratorio de Investigación en Nuevas Tecnologías Informáticas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP); y el segundo, un proyecto de Vinculación Tecnológica de la UNLP. Su objetivo es contribuir al desarrollo de tecnologías digitales de bajo costo para la producción agroecológica a escala de agricultura familiar, facilitando el manejo preventivo de enfermedades foliares causadas por hongos y pseudohongos. Para ello, se emplea el sensado automático de las condiciones microambientales de los invernaderos mediante tecnologías IoT. El proyecto se lleva a cabo en la zona hortícola del periurbano platense, específicamente en dos quintas de familias productoras en la localidad de Arana (La Plata). En este contexto, el presente trabajo analiza: a) los aprendizajes de la solución IoT “ad hoc” desplegada y, b) la recolección de datos durante una etapa experimental de 5 meses y medio. En este último punto se evalúa, la cantidad de datos recepcionados, las posibles causas de pérdidas, la calidad de los datos y la identificación de umbrales ambientales relevantes para el problema en estudio. Los primeros hallazgos de este análisis nos permiten determinar la magnitud de las pérdidas y su relevancia en el problema, identificar datos anómalos que requieren normalización y detectar discrepancias en las mediciones obtenidas a partir de distintos dispositivos. Estos aspectos son fundamentales para el desarrollo de un modelo predictivo destinado a la detección de enfermedades foliares, que constituye el objetivo principal de estos proyectos.

Palabras clave: Agroecología, Agricultura Familiar, IoT, LoRa, Umbrales Ambientales.

A low-cost IoT solution for predicting foliar diseases in agroecological crops at a family farming scale. Experience in the peri-urban area of La Plata

Abstract. This work is framed within two projects: the first, an R&D&I project titled "Automatic prediction of leaf diseases in leaf crops produced in greenhouses under agroecological management", developed by the Research Laboratory on New Information Technologies at the National University of La Plata (LINTI-UNLP); and the second, a Technological Linkage project of UNLP. Its objective is to contribute to the development of low-cost digital technologies for agroecological production at the scale of family farming, facilitating the preventive management of foliar diseases caused by fungi and pseudofungi. For this purpose, automatic sensing of microenvironmental conditions in greenhouses is employed using IoT technologies. The project is being carried out in the horticultural area of peri-urban La Plata, specifically in two farms belonging to producer families in the locality of Arana. In this context, this paper analyzes: a) the learnings from the 'ad hoc' IoT solution deployed, and b) the data collection during a 5-and-a-half-month experimental stage. The latter point evaluates the amount of data received, the possible causes of losses, the quality of the data, and the identification of environmental thresholds relevant to the problem under study. The initial findings of this analysis allow us to determine the magnitude of losses and their relevance to the problem, identify anomalous data requiring normalization, and detect discrepancies in measurements obtained from different devices. These aspects are fundamental for the development of a predictive model for the detection of leaf diseases, which is the main objective of these projects.

Keywords: Agroecology, Family Farming, IoT, LoRa, Environmental Thresholds

1 Introducción

En Argentina el cinturón hortícola de La Plata abastece entre el 60% y el 90% de la verdura fresca que consume la provincia de Buenos Aires y otras provincias del país, con lo cual se constituye en el cinturón hortícola más importante de la Argentina (Benencia R. et al, 2021) (Benencia R. et al, 2005) (Benencia R., 2002) (García M., 2015). Esta producción es llevada adelante por familias productoras de alimentos, en general en quintas de tierras alquiladas, en las que combinan producción bajo invernaderos y a campo abierto, en una superficie total de producción que no supera las 1,5 ha.

Específicamente en el artículo aquí presentado se trabaja con dos familias productoras de la Agricultura Familiar (AF) de la organización social “Manos de la Tierra”, cuyas quintas están localizadas en la zona de Arana (La Plata, provincia de Buenos Aires), a una distancia de 100 mts. aproximadamente entre ambas. Desde el 2021 dichas familias se encuentran transitando un proceso de transformación en su modo de producción, orientado al diseño y manejo de las quintas bajo los principios de la agroecología, proceso que es acompañado por un equipo técnico de la Universidad Nacional de la La Plata (UNLP) en el marco de la experiencia de comercialización solidaria “La Justa” (Villegas Pesi et al, 2023) (Sarandón S. J., 2002).

La incorporación de tecnologías digitales no es ajena al sector agropecuario, tanto en las etapas de producción como de comercialización. Actualmente la agroinformática es un campo de conocimiento interdisciplinario emergente, que amplía los saberes de la Agronomía y la Informática, ofreciendo herramientas (hardware, software, metodologías, etc) para optimizar los procesos y resultados de la producción del sector agropecuario. En este punto, un problema que se evidencia en la mayoría de las prácticas de la AF es la carencia de herramientas y metodologías sistematizadas de recopilación de datos mediante procesos de digitalización que faciliten la obtención de información en tiempo real. A pesar de contar con métodos de recopilación de información in-situ, mediante procesos realizados de forma artesanal, usando planillas de cálculo que se cargan en diferido, estos procesos son muy propensos a errores debido a la falta de validación automática, posibles pérdidas involuntarias de los registros en papel y la falta de escalabilidad, entre otros.

El trabajo aquí presentado se contextualiza en dos proyectos, el primero “Predicción automática de enfermedades foliares en cultivos de hoja producidos en invernaderos bajo manejo agroecológico”¹ desarrollado en el LINTI-UNLP (Laboratorio de Investigación en Nuevas Tecnologías Informáticas, UNLP) y el segundo, un proyecto de “Vinculación Tecnológica de la UNLP”². En ambos proyectos se trabaja en la detección temprana de enfermedades foliares de cultivos producidos en invernaderos bajo manejo agroecológico, usando tecnologías de IoT (Internet of Thing) de bajo costo (sensores y microcontroladores para transmisión de información). Se trata de enfermedades endémicas en la región en la que se desarrolla el proyecto, ejemplo de ellas son el oídio (*Erysiphe Cichoracearum*), la mildiu (*Bremia* spp.), la viruela de acelga (*Cercospora* spp.) y la roya blanca (*Albugo* spp.). El equipo de trabajo es

¹ <https://www.linti.unlp.edu.ar/index.php/2024/05/29/proyectos-de-la-facultad-de-informatica/>

² <https://www.linti.unlp.edu.ar/index.php/2025/02/14/prediccion-automatica-de-enfermedades-foliares/>

multidisciplinario y está conformado por especialistas en fitopatología vegetal, agroecología y agricultura familiar, informáticos e ingenieros. El enfoque de la Agroinformática adoptado atiende las demandas de tecnología digital en quintas con manejo agroecológico a escala AF.

El objetivo general de los proyectos mencionados es predecir la aparición de las enfermedades foliares indicadas mediante la recolección automática de datos ambientales (temperatura y humedad relativa) en invernaderos con manejo agroecológico, localizados en el cinturón hortícola de La Plata. Esta información permite anticipar de manera preventiva la incidencia de hongos y pseudohongos, favoreciendo la aplicación temprana de bioinsumos. El propósito final es mejorar la producción de hortalizas, preservar su calidad agroecológica, evitar desperdicios y contribuir a una mejor comercialización.

Los desafíos tecnológicos presentados durante el desarrollo del proyecto requirieron de un diseño híbrido “ad-hoc” del modelo de transmisión de datos que combina tecnologías LoRaWAN e Internet domiciliaria y el uso de energías renovables para la energización del nodo IoT que sensa los datos microambientales del invernadero (Castro N. et al, 2024a, pp.126-128)(Castro N. et al, 2024b).

En este artículo se analiza: la solución IoT “ad hoc” desplegada y, la recolección de datos en una etapa experimental de 5 meses y medio. Para el análisis de este último punto se evalúa, la cantidad de datos recepcionados, las posibles causas de pérdidas, la calidad de los datos y la identificación de umbrales ambientales relevantes para el problema en estudio. Determinar la magnitud de las pérdidas y su relevancia en el problema, identificar datos anómalos que requieren normalización y detectar discrepancias en las mediciones obtenidas a partir de distintos dispositivos, es central para el desarrollo de un modelo predictivo destinado a la detección de enfermedades foliares, que constituye el objetivo principal del proyecto.

En la sección 2 se describe el marco conceptual sobre IoT en la AF en el que se sustenta este proyecto, en la sección 3 la infraestructura tecnológica diseñada e implementada en la quinta, en la sección 4 se describe y analiza la recolección de datos de los sensores DHT22 instalados en el invernadero, en la sección 5 se identifican umbrales ambientales que funcionan como semáforos que alertan la aparición de las enfermedades buscadas y recomiendan el uso de bioinsumos de manera preventiva y, finalmente se comparten las conclusiones.

2 IoT en la agricultura familiar

IoT es un sistema de dispositivos electrónicos interconectados con capacidad de recopilar y transferir datos a través de una red inalámbrica sin intervención de personas. El objetivo de IoT es ampliar la conectividad a casi todos los objetos (cosas) que se encuentran en el espacio físico y a partir de ello desarrollar nuevas aplicaciones en múltiples campos de conocimiento entre ellos la Agroinformática (Aly M. et al, 2019). El camino hacia una “agricultura inteligente” busca nuevas soluciones para mejorar la productividad agrícola mediante soluciones basadas en IoT, entre ellas la detección temprana de enfermedades en los cultivos, tema de interés del proyecto en el que se inscribe este trabajo (Pagano A. et al, 2023). En este sentido, el monitoreo continuo ofrece varias ventajas, entre ellas la detección temprana de plagas mediante

sensores y análisis de imágenes identificando anomalías en los cultivos permitiendo una intervención oportuna con medidas preventivas o tratamientos específicos. Varios trabajos previos han demostrado la relevancia de respaldar la toma de decisiones de manejo de los cultivos con modelos predictivos para ayudar a los productores a evaluar y pronosticar el riesgo de enfermedades y la necesidad de intervención (Brewster C. et al, 2017) (Hughes G., 2019) (Shah D.A. et al 2019). Antecedentes relevantes sobre el tema de este trabajo en nuestra región son: a) En Brasil, el equipamiento Colpan, diseñado para recolectar parámetros ambientales que sirve de auxilio en la previsión de enfermedades de varios cultivos. Este equipo contiene un sensor de humedad foliar y otro de temperatura, que son fijados junto a la planta. Almacena y procesa la información de acuerdo con tablas que calculan el valor diario de severidad, indicando cuándo se debe realizar la primera aplicación para controlar la enfermedad (Becker, 2010) y b) En Argentina, se lleva adelante el modelo de prevención de la enfermedad roya asiática de la soja, que tiene en cuenta las condiciones ambientales de temperatura diurna y nocturna, humedad relativa con mínimo de 6 hs de rocío, alternancia de lluvias con períodos secos, etc. (Ivancovich, 2011; Ploper 2006; Ploper, 2014).

En el marco del proyecto aquí presentado, el monitoreo continuo y automático de las condiciones microambientales de los invernaderos es útil para planificar la aplicación oportuna, precisa y eficiente de bioinsumos, como fertilizantes orgánicos o biopesticidas, fortaleciendo el manejo agroecológico en la producción. Al conocer el estado de las plantas de forma continua, es posible ajustar las dosis y los momentos de aplicación de los bioinsumos según las necesidades específicas de los cultivos, evitando el desperdicio y maximizando su efectividad. El uso adecuado de bioinsumos contribuye a la producción de cultivos más sanos y de mayor calidad.

Los sensores son componentes fundamentales en proyectos de IoT debido a su capacidad para capturar datos del entorno físico y convertirlos en información digital. Estos dispositivos permiten monitorear y medir una amplia gama de variables, como temperatura, humedad, presión atmosférica, movimiento, entre otros. Esta información es esencial para tomar decisiones informadas en tiempo real, optimizar procesos y mejorar la eficiencia, así como posibilitar el desarrollo de servicios y aplicaciones inteligentes (Atzori, L. et al, 2010).

El concepto de red de datos de bajo consumo de energía, característica esencial en IoT, es crucial para las soluciones tecnológicas que requieren recabar datos en sitios alejados de las grandes ciudades o en donde la cobertura de Internet no llega o es deficitaria, como es el caso de gran parte del periurbano platense donde se desarrolla este proyecto. Entre las tecnologías de comunicación inalámbrica para las redes IoT, disponibles en Argentina y adecuadas para la aplicación en Agroinformática, se encuentran Sigfox, GSM y LoRaWAN, las cuales ofrecen una cobertura de largo alcance (Aly M. et al, 2019). Otras tecnologías de comunicación que podrían ser utilizadas son las redes satelitales que actualmente en Argentina es un servicio en expansión y los enlaces inalámbricos de cooperativas que ofrecen conexión a Internet en la zona. Sin embargo, estos servicios no siempre están disponibles y en general son costosos.

La tecnología de comunicación inalámbrica LoRa (acrónimo de Long Range) combina un consumo de energía muy bajo con un largo alcance efectivo, por lo tanto, ofrece una solución adecuada para conexiones a grandes distancias y para redes de

IoT conformadas por sensores que no disponen de corriente eléctrica de red para su alimentación y deben utilizar baterías.

Existen múltiples antecedentes de uso de redes LoRaWAN en la producción agropecuaria y en invernaderos concretamente (Mezouari A. et al 2023) (Singh R.K et al, 2020) (Septafiansyah Dwi Putra et al, 2022). En estos trabajos se señalan las ventajas ofrecidas por este tipo de tecnología de red para entornos inalámbricos de área amplia: comunicaciones de largo alcance manteniendo el bajo consumo de energía (2km a 5km en entornos urbanos y hasta 15km en zonas despejadas); operación en bandas de frecuencias no licenciadas (ISM) como 915MHz (Lora-Alliance, sf); servicios de red para confirmación de mensajes, encriptación, multicasting y activación/registro en la red “over the air”, no presentando limitaciones en el número de paquetes transferidos. Sin embargo, no hemos encontrado antecedentes relevantes en quintas de producción familiar con manejo agroecológico en zonas con limitada conectividad (telefonía celular e Internet) que den cuenta del uso de tecnologías digitales en recolección automática de datos para mejora en los procesos de producción.

Los costos de despliegue y operación de las redes LoRaWAN son bajos en comparación con otras tecnologías similares como las previamente mencionadas, y por otro lado ofrece una buena disponibilidad de equipos y operadores en el mercado. Estas características destacables hacen factibles proyectos como el presentado.

Desde el punto de vista de infraestructura tecnológica y de comunicación disponible en la ciudad de La Plata para sensado automático de datos ambientales, la red LoRaWAN es un servicio que la UNLP obtiene sin costo por medio de un convenio con la empresa YEAP. Este servicio permite el despliegue con infraestructura propia y la reducción de costos operativos recurrentes, resultando una opción apropiada para el desarrollo de proyectos como el descrito (Candia A. et al, 2019).

3 Infraestructura tecnológica desplegada

La etapa inicial del trabajo en relación a la infraestructura tecnológica consistió en: a) construir nodos IoT LoRa de bajo costo alimentados con baterías de gel de 12V para sensar datos ambientales de los invernaderos en los cuales se producen los cultivos a estudiar y, b) transmitir dichos datos sensados a través de la red proveedora de servicios de comunicación LoRaWAN de la zona, provista por la empresa YEAP, al servidor de aplicaciones del LINTI para su posterior análisis. Sin embargo, en una etapa posterior se presentaron una serie de limitaciones, las cuales obligaron a la redefinición del modelo de comunicación y de la provisión de energía eléctrica en los invernaderos para mantener el tiempo de autonomía de las baterías que alimentan al nodo (Castro N. et al, 2024a, pp. 122-128).

En síntesis, si bien aparentemente el diseño inicial de la solución tecnológica fue simple, a medida que se avanzó en el desarrollo del proyecto se complejizó, obligando a un rediseño de la infraestructura tecnológica, que consistió en:

- a) Mantener el protocolo LoRaWAN en los invernaderos para facilitar la expansión y conexión de nodos, especialmente si se restablece el servicio de conectividad de YEAP ya que el mismo no está disponible en la actualidad.

- b) Instalar un gateway LoRaWAN en la vivienda de las familias productoras para hacer uso del servicio de Internet domiciliaria. En este punto, la baja calidad y falta de confiabilidad de los servicios en zonas semi-rurales, representan desafíos para el proyecto (Castro N. et al, 2024a, pp. 127).
- c) Desplegar un panel solar para asegurar la autonomía energética de los nodos LoRa instalados en el invernadero. Esta instalación permite reducir significativamente los períodos de intervención humana vinculados al recambio de las baterías.

La Fig. 1 muestra la arquitectura de comunicación diseñada e implementada.

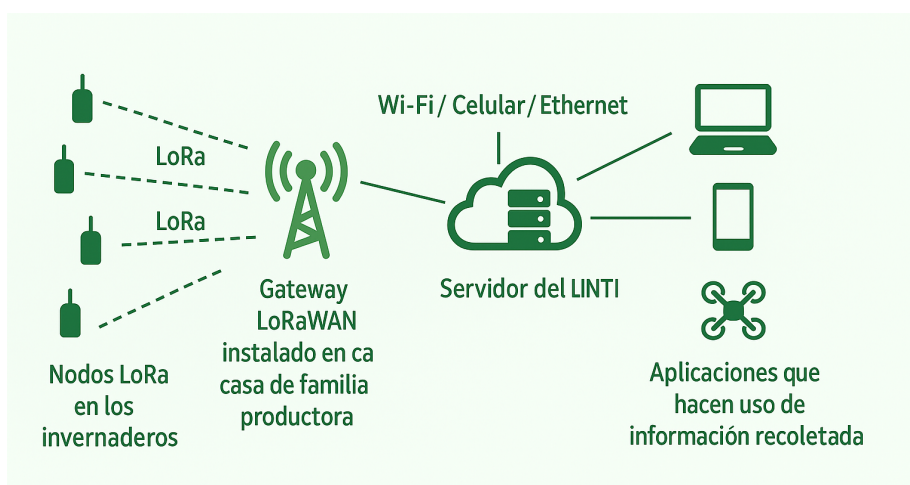


Fig. 1. Arquitectura de comunicación desplegada

La arquitectura descrita en la Fig. 1 presenta las siguientes características claves:

- a) Nodos LoRa en los invernaderos: recopilan datos de variables ambientales relevantes, como temperatura y humedad relativa ambiente, factores críticos para la aparición de enfermedades foliares. La ubicación cercana a los cultivos de los sensores instalados en los nodos, garantiza mediciones precisas y en tiempo real. Fig. 5.
- b) Gateway LoRaWAN instalado en la vivienda de la familia productora: se optó por desplegar una red LoRaWAN “ad-hoc” para el proyecto, dado que la red pública a la que se tenía acceso no está operativa en la zona. Este dispositivo actúa como punto central de recepción de datos provenientes de los nodos LoRa ubicados en los invernaderos. En el gateway se configura un network server embebido para la autenticación de dispositivos y forwarding de paquetes de datos hacia los servidores de aplicación del LINTI. Este gateway transmite los datos recopilados, a través de una conexión Ethernet con salida a Internet a los servidores mencionados, para su posterior procesamiento y análisis.
- c) Servicios desplegados en el LINTI: dentro de la infraestructura del laboratorio se disponibilizan tres servicios con roles activos dentro de la arquitectura desplegada. Los mismos se describen a continuación.

- La aplicación Node-RED: es una herramienta de desarrollo basada en flujos visuales donde se programa la secuencia que recibe los datos, los decodifica y los envía hacia el flujo general encargado de almacenarlos en InfluxDB. Fig. 2.

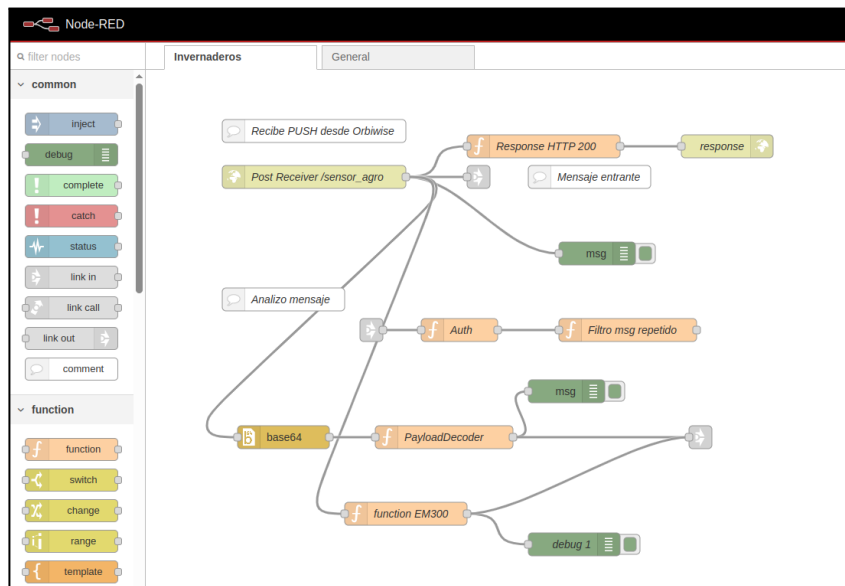


Fig. 2. Flujo Invernaderos en Node-RED: recepción y decodificación de datos

- El gestor de base de datos InfluxDB: está diseñada específicamente para manejar series de tiempo (TSDB), como los generados por sensores, métricas de servidores, datos de IoT o logs de aplicaciones, entre otras. Está optimizada para insertar, consultar y retener grandes volúmenes de datos cronológicos. Es ideal para monitoreo en tiempo real. El flujo general es el encargado de la inserción de los datos en la base de datos (Fig. 3).

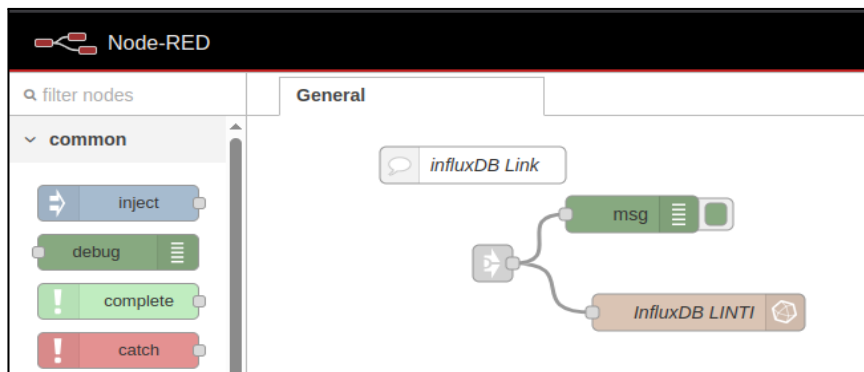


Fig. 3. Flujo General en Node-RED de inserción de datos en InfluxDB

- La aplicación Grafana: es la herramienta de visualización y monitoreo de datos en tiempo real. Permite crear tableros interactivos con gráficos, tablas y mapas, conectándose a distintas fuentes de datos, en este caso de estudio toma los datos de InfluxDB. La Fig. 4 muestra las medidas de los sensores de temperatura y humedad en un intervalo de tiempo.

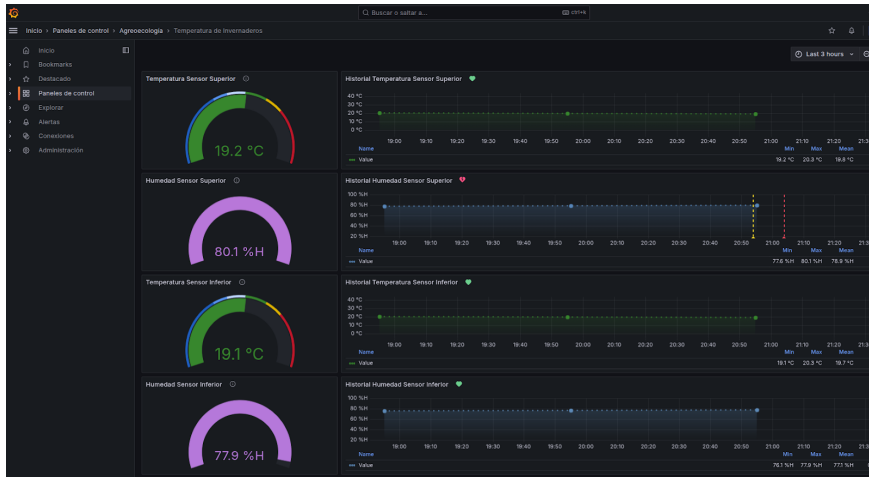


Fig. 4. Tablero de visualización de Grafana con datos de temperatura y humedad

4 Recolección de datos en la etapa experimental

En este apartado se describe la metodología de recolección de datos, el análisis de las pérdidas y de la calidad de los mismos, en la etapa experimental del proyecto, comprendida entre el 14 de octubre de 2024 y el 31 de marzo de 2025. El objetivo de esta etapa es validar la solución IoT para: a) la implementación de alertas relacionadas a “umbrales ambientales” que recomiendan la aplicación preventiva de bioinsumos y, b) el posterior diseño de un modelo predictivo de las enfermedades foliares en estudio. En esta etapa experimental, la recolección de datos no se vinculó con los cultivos a estudiar dado que los mismos (acelga y/o remolacha) son cultivos de otoño-invierno en la zona.

4.1 Metodología de recolección de datos

Los datos microambientales (temperatura y humedad relativa ambiente) se toman en intervalos de una hora, desde dos sensores DHT22 instalados en el nodo IoT del invernadero, ubicados a distinto nivel respecto del suelo. Estas mediciones se realizaron durante 5 meses y medio. Las mediciones repetidas fueron descartadas dado que es información redundante que no aporta novedad. La Tabla 1 describe la caracterización de la muestra.

Desde el equipo de agrónomos, que forman parte del proyecto, se tomó la decisión de hacer un muestreo cada una hora, debido a que las variaciones de temperatura y

humedad que se producen en menos de una hora no son significativas para el problema estudiado.

Table 1. Caracterización de la muestra de datos.

Período de tiempo estudiado	14/10/24 - 31/03/25
Cantidad de muestras esperadas (teóricas)	4038
Cantidad de muestras recibidas (reales)	3315
Cantidad de muestras perdidas	723
Porcentaje de pérdida de datos	18 %

4.2 Análisis de la pérdida de datos

La mayor cantidad de pérdidas se registraron en los períodos de tiempo que se muestran en la Tabla 2. Estas pérdidas son las más relevantes dado que se producen en intervalos de tiempo medidos en días consecutivos.

Table 2. Intervalos de tiempos con pérdidas de datos más significativas en la etapa experimental.

Inicio	Fin	# Días	# Horas	#Muestras pérdidas	% Pérdida de datos
2024-10-31	2024-11-07	6	12:05	155	21 %
2024-12-14	2024-12-19	5	5:20	124	17 %
2025-03-01	2025-03-07	5	14:20	133	18 %
Total de pérdida de datos en intervalos de días consecutivos					56 %

La instalación del gateway LoRaWAN, como se mencionó anteriormente, depende de la conectividad a Internet y del suministro eléctrico, ambos domiciliarios, de la familia productora. Las causas de la pérdida de datos presentadas en la Tabla 2 están vinculadas a la configuración “ad hoc” de la instalación IoT, específicamente: a) cambios en la clave de la conexión Wi-Fi del router, lo que requiere la reconfiguración del gateway, y b) reinicios del gateway debido a desperfectos en su funcionamiento. Aunque estos son problemas operativos menores, su resolución puede tomar un tiempo considerable, ya que es necesario coordinar una visita con la familia productora para solucionarlos.

Se registraron otras pérdidas de datos en intervalos de tiempo menores a un día, las cuales se muestran en la Tabla 3. Entre las causas identificadas, se encuentran, en orden de relevancia: a) el funcionamiento anómalo del gateway instalado en la vivienda de la familia productora, cuya solución es el reinicio del mismo de manera automática o manual (a cargo de la familia productora); b) fallas no habituales en la placa microcontroladora del nodo IoT instalado en el invernadero cuya solución consiste en reiniciar el nodo, y c) cortes de energía en los servidores del LINTI durante el mes de diciembre.

Table 3. Pérdidas de muestras menores a un día en la etapa experimental.

Intervalo de tiempo	# Ocurrencias	# Muestras perdidas	% Pérdidas
(24 hs, 10 hs]	11	164	23 %
(10 hs, 5 hs]	13	83	12 %
(5 hs, 1 hs)	49	64	9 %
Total de pérdida de datos en intervalos menores a un día			44 %

Para el problema que se está estudiando, las pérdidas de datos identificadas no son significativas dado que la evolución de los hongos (como el oídio) no requiere una vigilancia continua e ininterrumpida. La mayoría de las patologías fúngicas se evidencian gradualmente. Sin embargo, la detección precoz y la supervisión continua con registros a lo largo del día, es decir contar con mediciones a la mañana temprano, al mediodía, final de tarde y a la noche, son fundamentales.

4.3 Análisis de la calidad de datos

Se evaluó el desempeño de los dos sensores de temperatura y humedad DHT22 del nodo IoT instalados en el invernadero durante un periodo continuo de observación de un mes, desde el 14 de marzo al 14 de abril del 2025. Ambos sensores mostraron un comportamiento similar en términos de sensibilidad, rango, precisión, resolución y exactitud.

En el problema estudiado, la calidad de los datos se define a partir de la exactitud de las mediciones atmosféricas. La misma está determinada por el contexto específico en el que se desarrolla el proyecto, concretamente mediante la comparación cruzada de mediciones obtenidas a través del uso de tres tipos diferentes de sensores: DHT22, Milesight Smart IoT Sensor Serie EM300 y el de un termohigrómetro de uso agronómico, como se muestra en la Fig. 5.

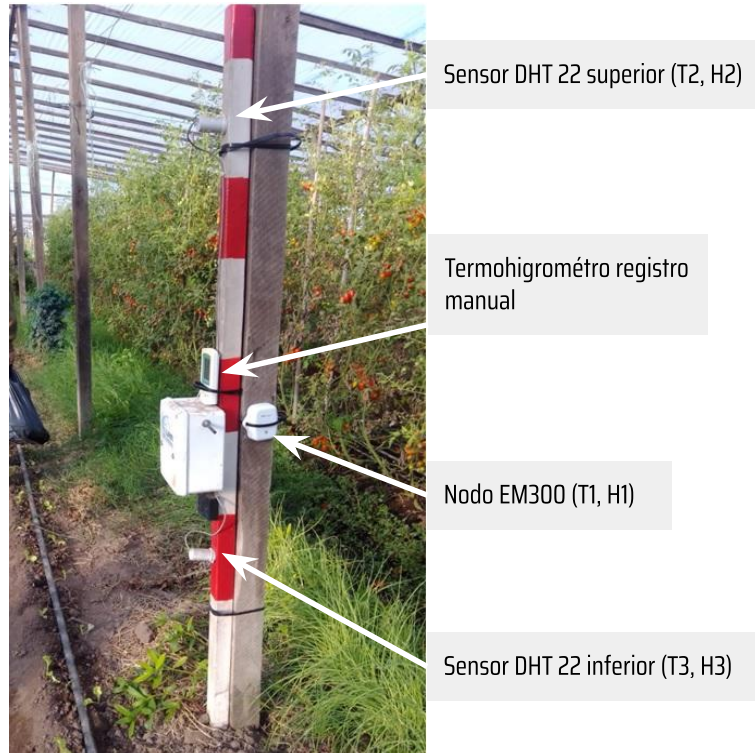


Fig. 5. Disposición de sensores y termohigrómetro

Esta verificación mediante fuentes complementarias permitió identificar discrepancias puntuales, especialmente bajo condiciones de alta humedad. A pesar que las especificaciones técnicas de los fabricantes del sensor DHT22 indican un rango de medición de 0%-100% HR con precisión típica de $\pm 2\%$ -5% y la curva de linealidad en la práctica es *cuasi lineal* debido a que la mayor desviación ocurre cerca de los extremos (0-10% y 90-100%), como sucede con la mayoría de los sensores capacitivos de humedad, en este trabajo se observaron limitaciones en la medición de humedad relativa del aire cuando la misma supera el 80 %, momento en el cual los sensores DHT22 tienden a saturarse, alcanzando el máximo de escala y perdiendo exactitud, como se muestra en la Fig. 6. Estos registros ocurrieron particularmente desde las 21 hs hasta las 9 hs del día siguiente. En la misma figura los datos de las columnas T1, H1, corresponden al nodo industrial; T2, H2, corresponden al sensor superior DHT22 y T3 y H3 al inferior.

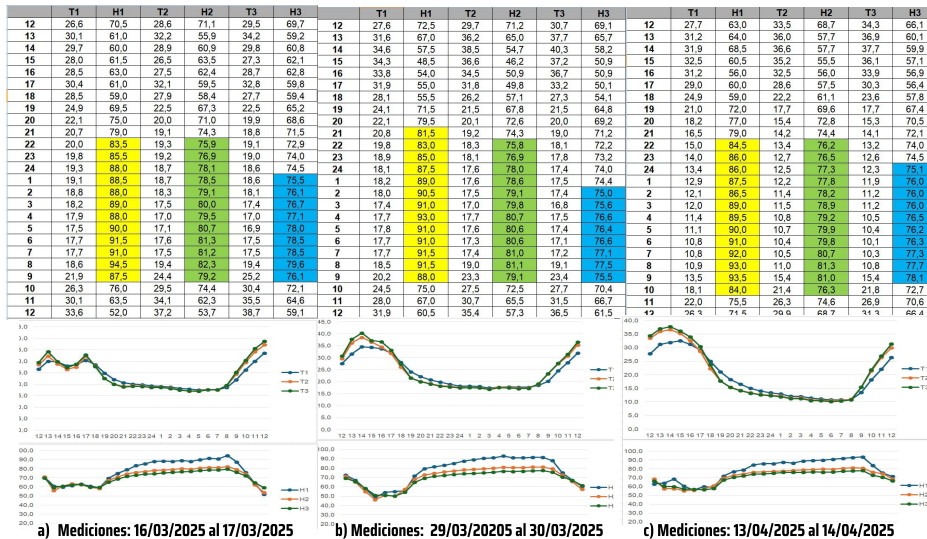


Fig. 6. Mediciones comparadas: registro de dos sensores DHT22 (H2 y H3) y del sensor industrial (H1), durante 24 horas

De las muestras recolectadas se observa que los datos de humedad del sensor superior DHT22 (T2, H2) presentan una tendencia similar a las del nodo industrial a partir de registros superiores al 75%. La linealidad y la histéresis de los sensores DHT22 se mantuvieron dentro de márgenes aceptables para aplicaciones no críticas, lo que sugiere que los mismos pueden ser útiles como herramientas de monitoreo ambiental en sistemas productivos en invernaderos, aunque con precaución en escenarios de alta humedad. No se descarta que las distorsiones de la mediciones detectadas puedan ser causadas por problemas de diseño de los contenedores en donde se alojan los sensores DHT22.

5 Construcción de umbrales ambientales

A partir del muestreo realizado en la etapa experimental del proyecto se comenzó a trabajar en la construcción de “umbrales ambientales”, entendidos éstos como valores críticos o rangos específicos de variables microambientales específicamente temperatura y humedad relativa ambiente. La probabilidad de aparición o propagación de enfermedades foliares, como el oídio, hongo preponderante en la zona del periurbano platense en cultivos de invernadero, se incrementa significativamente a partir de estos umbrales.

La construcción de “umbrales ambientales” en sistemas agroecológicos a escala agricultura familiar, se derivan de estudios agronómicos previos y de la validación empírica en campo a partir de la experiencia de las familias productores, actuando como indicadores para la toma de decisiones en el manejo fitosanitario y la aplicación de bioinsumos de forma preventiva.

En este proyecto, las tecnologías que usan los productores son invernáculos de estructura de madera de tipo “capilla” con ventilación lateral, sin calefacción, cuyas dimensiones son de aproximadamente de 50 mts por 50 mts y bajo condiciones de manejo agroecológico del suelo en el que se garantiza la rotación de cultivos. Esta caracterización es representativa del modelo de producción hortícola del periurbano platense. Bajo estos supuestos, para la construcción de los “umbrales ambientales” se consideraron relevantes los valores de temperatura y humedad relativa ambiente sin desconocer la presencia de otras variables, entre ellas la radiación solar, la dirección e intensidad del viento, la humedad del suelo y el CO₂.

Del muestreo de los datos recolectados realizado entre el 14 de marzo y el 14 de abril de 2025, se observa que los valores de la humedad relativa ambiente en el invernadero superan el 75% y los de temperatura varían entre los 13° y 25°, en horarios de final de la tarde y noche (datos resumidos en 3 días en la Fig. 6). En este sentido, se observa que cuando los valores de humedad superan el rango del 75%, los de la temperatura se mantienen en valores relativamente bajos.

Investigaciones sobre condiciones ambientales que favorecen la aparición de enfermedades foliares sugieren que registros consecutivos en el tiempo de valores que superen el 75% de humedad y 25° de temperatura, determinan condiciones para el desarrollo de dichas enfermedades. Estos valores podrían ser usados para establecer un primer “umbral ambiental” que actúe como alerta temprana y recomiende la aplicación preventiva de biosinsumos dando tiempo a que éstos sean lo más efectivos posibles. A su vez, se requiere contrastar estas alertas tempranas con el estado del cultivo en campo, es decir no obstante los registros automáticos se requiere una observación acerca de cómo se manifiesta el cultivo ante estos valores microambientales y la estrategia de manejo del cultivo a abordar.

A partir del establecimiento de estos “umbrales ambientales” se construirán “semáforos ambientales” como herramienta visual que represente el estado de las variables observadas (temperatura y humedad relativa ambiente) y que utilizará los códigos de colores verde, amarillo y rojo, según el grado de criticidad, para indicar condiciones óptimas, de advertencia o severas, facilitando la toma de decisiones.

6 Conclusiones

El desarrollo de una infraestructura de IoT de bajo costo, basada en tecnologías híbridas que combinan LoRaWAN e Internet domiciliaria, para ofrecer conectividad, junto a tecnologías de energías limpias para alimentar las baterías de los nodos IoT, han demostrado ser una alternativa válida en el campo de problemas de la agroecología y la AF. La deficiente cobertura del servicio de conectividad de la red LoRaWAN en la zona en la que se desarrolla este proyecto (periurbano platense) condiciona su uso en forma integral: a) LoRaWAN se utiliza para la conexión entre el invernadero y el gateway LoRaWAN instalado en la vivienda de la familia productora y, b) el gateway de Internet domiciliaria para enviar los datos sensados a los servidores del LINTI. A pesar de no haber podido usar la red LoRaWAN del proveedor YEAP desde los sensores hasta el acceso a dicha red, el uso de LoRaWAN para la conexión

de los nodos IoT de los invernaderos con el gateway LoRaWAN permitió cubrir distancias medias que por ejemplo con Wi-Fi no sería posible.

La confiabilidad de los instrumentos de medición, especialmente de los sensores DHT22 utilizados en esta solución, constituye un aspecto central del proyecto, ya que impacta de manera directa en la validez de los datos recolectados. Mediante un contraste de toma de datos producidos por un sensor industrial (EM300) y registros manuales obtenidos de un termohigrómetro de campo, se concluyó que la linealidad y la histéresis de los sensores DHT22 se mantuvieron dentro de márgenes aceptables para aplicaciones no críticas. Esto sugiere que los mismos pueden ser útiles como herramientas de monitoreo ambiental en sistemas productivos bajo cubierta, aunque con precaución en escenarios de alta humedad en donde se observaron algunas distorsiones. Para continuar el estudio de confiabilidad de los datos es importante conocer los datos meteorológicos externos, para ello se podría sumar información meteorológica de una estación instalada en el mismo predio de la quinta o bien apoyarse en una estación cercana.

En relación a la metodología de muestreo de datos, desde el equipo técnico, se consideró adecuado tomar los valores de temperatura y humedad relativa ambiente que se producen en el invernadero en intervalos de una hora, dado que las variaciones de estos registros en lapsos menores no son significativas para el tipo de enfermedad foliar que se está estudiando.

Del análisis de la pérdida de datos, en la etapa experimental desarrollada entre el 14 de octubre de 2024 y el 31 de marzo de 2025, se observó una pérdida del 18% por causas de diferente nivel de relevancia. Sin embargo, esta pérdida de datos no es significativa dado que la evolución de los hongos como el oídio, no requieren una vigilancia continua e ininterrumpida.

El establecimiento de “umbrales ambientales” a partir de datos de temperatura y humedad relativa, recolectados mediante sensores IoT LoRa de bajo costo, permite construir “semáforos ambientales” que integran principios de soberanía tecnológica, soberanía de los datos y sustentabilidad ambiental. La detección precoz de enfermedades foliares, a partir de las alertas generadas por el valor del semáforo ambiental y la observación continua in-situ por parte de técnicos y productores, resulta fundamental para la toma de decisiones orientadas a la aplicación preventiva de bioinsumos y al manejo agroecológico de los invernaderos. Además, estos “umbrales ambientales” pueden combinarse con técnicas de análisis predictivo para facilitar la toma de decisiones.

Referencias

Aly M., Khomh F., Guéhéneuc Y., Washizaki H. and Yacout S. (2019): Is Fragmentation a Threat to the Success of the Internet of Things?, IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, pp. 472–487. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2863180> (15/04/2025)

Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. Computer networks, 54(15), 2787-2805.

Benencia R., García M. y Quaranta G. (2021). Principales características y transformaciones de la pequeña horticultura familiar de La Plata. Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios N° 55 – 2do. semestre de 2021.

Benencia, R. y Quranta G. (2005). Producción, trabajo y nacionalidad: configuraciones territoriales de la producción hortícola del cinturón verde bonaerense. Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios, N° 23, 2do semestre de 2005. <https://www.ciea.com.ar/web/wp-content/uploads/2016/11/RIEA23-04.pdf> (16/04/2025)

Benencia, R. (2002). Transformaciones territoriales en la horticultura periurbana bonaerense en los últimos 50 años. El papel de la tecnología y la mano de obra. XIII Economic History Congress. Buenos Aires.

Becker, W. F. (2010). Validação dos sistemas de alerta Machardy e Colpam 40 para previsão da requeima do tomateiro. Em: Caçador, S.C. Summa Phytopathology. 36(3):210-215. <https://doi.org/10.1590/S0100-54052010000300004>

Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K. and Ellis, K. (2017). IoT in agriculture: Designing a Europe-wide large-scale pilot. IEEE Communications Magazine, 55(9), 26-33. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600528> (15/04/2025)

Candia A., Lo Grasso E, Fava L., Represa S., Diaz J. y Vilches D. (2019).LoRaWAN IoT Solutions for SmartCities. Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), Granada, Spain, pp. 265-269.

<https://doi.org/10.1109/IOTSMS48152.2019.8939228> (15/04/2025)

Castro N., Candia A., Queiruga C., Pagano M., Moscoso Ocampo M. y Díaz J. (2024a). Desafíos tecnológicos de un proyecto de IoT para la agricultura familiar y manejo agroecológico en invernaderos del periurbano de La Plata. Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2024) - JAIIO 53 (Universidad Nacional del Sur, 12 al 16 de agosto de 2024). ISSN 2451-7496. pp. 118-130. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/176985> (15/04/2025).

Castro N., Queiruga C., Candia A., Moscoso Ocampo M., Pagano M., y Díaz J. (2024b). Aprendizajes en el diseño de una infraestructura IoT para la Agricultura Familiar. Una experiencia en el cinturón hortícola de La Plata. XXX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. Facultad de Informática - UNLP, del 7 al 10 de octubre de 2024. ISBN 978-950-34-2428-5. pp. 873-881. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/172755> (15/04/2024)

García M. (2015). Horticultura de La Plata (Buenos Aires). Modelo productivo irracionalmente exitoso.ωRev. Fac. Agron. Vol 114 (Núm. Esp.1): 190-201.

Lora-Alliance (sf). <https://lora-alliance.org/> (15/04/2025)

Hughes G. (2017). The evidential basis of decision making in plant disease management. Annu. Rev. Phytopathol. 55, 41–59. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035342>

Ivancovich, A. (2011). Enfermedades de soja. Diagnóstico y Manejo. Editor/es: INTA.-Ediciones. INTA. Pergamino. Páginas/s: 79.
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/15954>

Mezouari A., Elkarch H., Haoul C., Dahou H. and Elgouri R. (2023). LoraWAN-based intelligent multi-greenhouse monitoring and control. E3S Web of Conferences 469, 00087. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346900087> (15/04/2025)

Pagano A., Croce D., Tinnirello I.y Vitale G. (2023). A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives. En: IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, Vol. 10, No. 4. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3230505> (15/04/2025)

Ploper, L. D. (2014). Importancia de las enfermedades que afectan las partes aéreas de las plantas de soja en la República Argentina. Asociación Argentina de Fitopatología.

Ploper, L. D. (2006). Roya Asiática de la soja en América. En: El Libro. ÍNDICE. - Editor/es: EEAOC. - Estación Experimental Agroindustrial O. Colombes (EEAOC). - Páginas/s: 196

Sarandón, S.J. (2002): La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El Impacto de la Agricultura intensiva de la Revolución Verde. En “AGROECOLOGIA: El camino hacia una agricultura sustentable”, SJ Sarandón (Editor), Ediciones Científicas Americanas, La Plata.1: 23-48.

Shah DA, Paul PA, De Wolf ED, Madden LV (2019). Predicting plant disease epidemics from functionally represented weather series. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2019 Jun 24;374(1775):20180273. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0273>

Singh R.K., Aernout M., De Meyer M., Weyn M. and Berkvens R. (2020). Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses. Sensors 2020. 20(7):1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827> (15/04/2025)

Septafiansyah Dwi Putra, Catherine Olivia Sereati and Hery Sutrisno (2022). Design of IoT Monitoring System Based on LoRaWAN Architecture for Smart Green House. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1012/1/012090> (15/04/2025)

Villegas Pesi, E; Gargoloff N.A.; Duré, S.V.; Gonzalez, J.; Tejerina, C. y Mierez, L. (2023). Reflexiones sobre el proceso de cambio hacia la Agroecología de Manos de la Tierra-La Justa. III Congreso Argentino de Agroecología. El Bolsón.

Test and Calibrate DHT22 / AM2302 / RHT03 hygrometers. (s/f). Kandrsmith.org. Recuperado el 4 de julio de 2025, de https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_dht22.html