

## Desarrollo de un modelo digital didáctico de lechugas aeropónicas

Raul O. Herrera-Arroyo<sup>1</sup>, Juan J. Martínez-Nolasco<sup>1</sup>,  
José E. Botello-Álvarez<sup>1</sup>, Mauro Santoyo-Mora<sup>1</sup>,  
Ricardo Yáñez-López<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México,  
Guanajuato,  
México

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Roque,  
Guanajuato,  
México

{M2303045, juan.martinez, enrique.botello,  
mauro.santoyo}@itcelaya.edu.mx,  
ricardo.yl@roque.tecnm.mx

**Resumen.** El aumento proyectado de la población mundial en conjunto con los desafíos del cambio climático, presentan nuevos retos para la seguridad alimentaria, especialmente en el sector agrícola. Ante esta situación se vuelve de suma importancia el desarrollar tecnologías avanzadas como cultivo sin suelo y la agricultura indoor. Estas técnicas permiten un uso más eficiente de los recursos al suministrar los nutrientes directamente a las plantas, reduciendo significativamente el desperdicio de agua y nutrientes. Los gemelos digitales surgen como una herramienta crucial en la búsqueda de soluciones para los desafíos de diversas áreas, en este caso es la agricultura, ya que permiten simular y analizar el comportamiento de los sistemas agrícolas en entornos cerrados. Un modelo digital es una representación cibernética de lo real, creada manualmente y desconectada de la realidad, ya que, a diferencia de un gemelo digital, en este solo se le introducen datos de manera manual. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo digital de una lechuga aeropónica como herramienta didáctica para una mejor comprensión de cómo afectan las variables ambientales al crecimiento de las plantas en ambientes controlados. Los resultados muestran un modelo digital funcional que permite a los usuarios explorar las afectaciones de las variables ambientales como la temperatura y humedad relativa al crecimiento de las plantas.

**Palabras clave:** Modelo digital, cultivos indoor, temperatura, humedad relativa.

### Development of an Educational Digital Model of Aeroponic Lettuces

**Abstract.** The projected increase in the world population, along with the challenges of climate change, presents new challenges for food security, especially in the agricultural sector. Given this situation, it becomes of paramount

importance to develop advanced technologies such as soilless cultivation and indoor agriculture. These techniques allow for a more efficient use of resources by supplying nutrients directly to the plants, significantly reducing water and nutrient waste. Digital twins emerge as a crucial tool in the search for solutions to challenges in various areas, in this case, agriculture, as they enable the simulation and analysis of the behavior of agricultural systems in closed environments. A digital model is a cybernetic representation of reality, created manually and disconnected from reality since, unlike a digital twin, only manual data input is provided. The objective of this work is to develop a digital model of aeroponic lettuce as a didactic tool for a better understanding of how environmental variables affect plant growth in controlled environments. The results show a functional digital model that allows users to explore the effects of environmental variables such as temperature and relative humidity on plant growth.

**Keywords:** Digital model, indoor crops, temperature, relative humidity.

## 1. Introducción

Para el año 2030, se espera que la población mundial alcance aproximadamente los 8.5 mil millones de personas, aumentando 1.18 mil millones más durante las próximas dos décadas, acercándose a los 9.7 mil millones de personas para el año 2050 [1], aunado al cambio climático, uno de los escenarios de preocupación global más grandes, es en el sector agrícola, ya que la producción suficiente y el suministro de alimentos se ven afectados [2-3]. Debido a estas circunstancias críticas se ha vuelto esencial desarrollar tecnologías y técnicas avanzadas para superar esta situación como lo son los cultivos sin suelo y la agricultura interior [4].

Los cultivos sin suelo, son sistemas de producción agrícola donde las plantas son cultivadas sin necesidad de tierra, en su lugar se utilizan soluciones nutritivas con todos los nutrientes necesarios para el correcto crecimiento de las plantas, un ejemplo de esta técnica es la hidroponía, en la cual, los nutrientes necesarios son suministrados a través de agua de riego y son absorbidos directamente desde las raíces, la solución no absorbida es recirculada, evitando desperdicios de agua y nutrientes [5].

La aeroponía es un método de cultivos sin suelo, donde las raíces de las plantas se suspenden en el aire, los nutrientes son suministrados por la atomización de solución nutritiva directamente a las raíces, logrando un crecimiento rápido y saludable [6]. La agricultura interior se refiere a las prácticas de cultivar plantas en ambientes cerrados, normalmente se utilizan sistemas de iluminación artificial, control de temperatura, humedad relativa y nutrientes, generando un ambiente óptimo para el desarrollo de los cultivos, con lo que se puede obtener mayor producción por unidad de área comparándola con agricultura en invernaderos [7].

La generación de este entorno controlado, junto al suministro de los nutrientes disueltos en el agua, conlleva un desafío relacionado con el consumo de energía, al ser un sistema automatizado [8]. Un Gemelo digital, es el equivalente digital de un objeto de la vida real, del cual refleja su comportamiento y estados a lo largo de su vida en el espacio virtual, permitiendo simular cambios en sus contrapartes físicas agregando análisis de datos avanzados como machine learning y modelos de predicción [9]. Un modelo digital es un reflejo de la realidad que se crea de manera manual y funciona



Fig. 1. Diagrama de la metodología propuesta.

Tabla 1. Valores mínimos, ideales y máximos de temperatura y humedad relativa para el crecimiento de lechugas.

Parámetros	Valores
Temperatura	Mínima: 7° C
	Ideal: 18–22° C
	Máxima: 28° C
Humedad relativa	Mínima: 40%
	Ideal: 70–80%
	Máxima: 85%

offline, es decir, el modelo digital no cambia cuando la realidad lo hace, en contrario, un gemelo digital, cambia cuando la realidad lo hace [10].

El objetivo de este trabajo fue el desarrollar un modelo digital de una lechuga aeropónica que pueda ser utilizado para el entendimiento temprano de cómo afectan las variables ambientales al crecimiento de una planta en un ambiente controlado. Cabe mencionar que los usos de los modelos digitales son muy diversos, siendo popular su uso en el sector energético, en el sector salud, logística, etc.

Con el desarrollo de este modelo digital didáctico, se contribuye a las nuevas aplicaciones de los modelos digitales y los beneficios que pueden aportar en el área de las tecnologías de la agricultura. En la sección 2 se describen algunos trabajos relacionados con el mostrado en este artículo, donde se observan las diferentes aplicaciones que tienen los modelos digitales. En la sección 3, se muestra la metodología seguida para la elaboración del modelo digital. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos hasta el momento. Finalmente, en la sección 5, se muestran las conclusiones a las que se llegaron, así como el trabajo a futuro.

## 2. Trabajos relacionados

Howard et al [11], presentan los primeros avances en el desarrollo de un gemelo digital para la optimización energética de los invernaderos, se utilizó la plataforma de simulación IA AnyLogic para la generación del modelo de simulación que abarque los pasos de producción desde la entrega de las plántulas hasta el envío de las plantas finales. Utilizaron entrevistas para conseguir información sobre los patrones de comportamiento de los operadores, lo cual será complementado con diversos parámetros para obtener una simulación más precisa del flujo de producción.

El objetivo de su gemelo digital es poder proporcionar un análisis de la velocidad de producción en invernaderos, realizar un análisis de la eficiencia energética y el cálculo de los plazos esperados de producción. Mokhtar et al [12], aplicaron tres algoritmos de



Fig. 2. Vista gráfica de la plántula (a), vista gráfica de la lechuga (b).

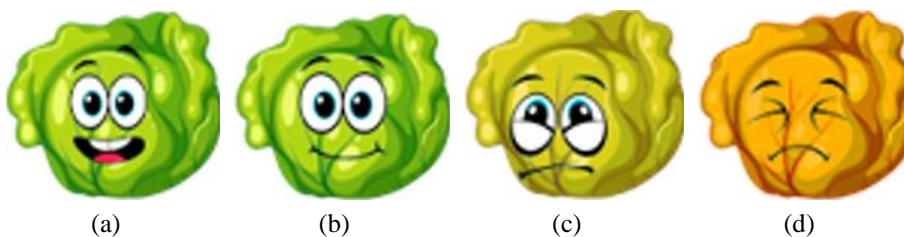


Fig. 3. Estados utilizados de la lechuga en el modelo digital. En estado óptimo (a), estado saludable (b), estado poco saludable (c), estado seco (d).

machine learning a tres diferentes técnicas de cultivos hidropónicos (NTF, aeroponía de torre, aeroponía piramidal).

Se evaluaron diferentes combinaciones de variables de entrada como número de hojas, consumo de agua, peso seco, longitud del tallo y diámetro del tallo. El objetivo de este trabajo es la predicción del rendimiento de la lechuga obtenida (peso fresco). Reyes et al [13], desarrollan un gemelo digital de los lechos de cultivo de un sistema de acuaponía con el objetivo de monitorear parámetros como el pH, electro conductividad, temperatura del agua, temperatura ambiente e intensidad de la luz, predecir con el uso de inteligencia artificial y machine learning la tasa de crecimiento y el peso fresco de los cultivos en crecimiento, ayudando al usuario a tomar mejores decisiones para obtener un entorno acuapónico saludable.

Jeong et al [14], realizaron un gemelo digital de un establo para cerdos. Las instalaciones virtuales desarrolladas reflejan las instalaciones porcinas reales junto con sus componentes como el interior, exterior, dispositivos de detección y los cerdos. El objetivo de este trabajo es obtener una disminución del consumo energético dentro del establo, instrumentado con capacidad de mantener la temperatura estable por medio de bombas de calor, y sistemas de paneles radiantes, por lo que se llevaron a cabo múltiples simulaciones para la gestión de la granja en el entorno digital.

En el desarrollo de este trabajo se hizo uso del software de simulación EnergyPlus para la simulación de la calefacción, utilizando la función de auto dimensionamiento incluida en el software. Utilizando el método de control propuesto por el gemelo digital, obtuvieron una reducción del 26.80% del consumo energético dentro de las instalaciones.

**Tabla 2.** Valor del FCTH necesario para mostrar cada uno de los estados en pantalla.

Estado mostrado en pantalla	FCTH
Estado optimo	$FCTH \geq 0.9$
Estado saludable	$0.9 > FCTH > 0.5$
Estado poco saludable	$FCTH \leq 0.5$
Estado seco	$FCTH \leq 0.5$ (en crecimiento máximo)

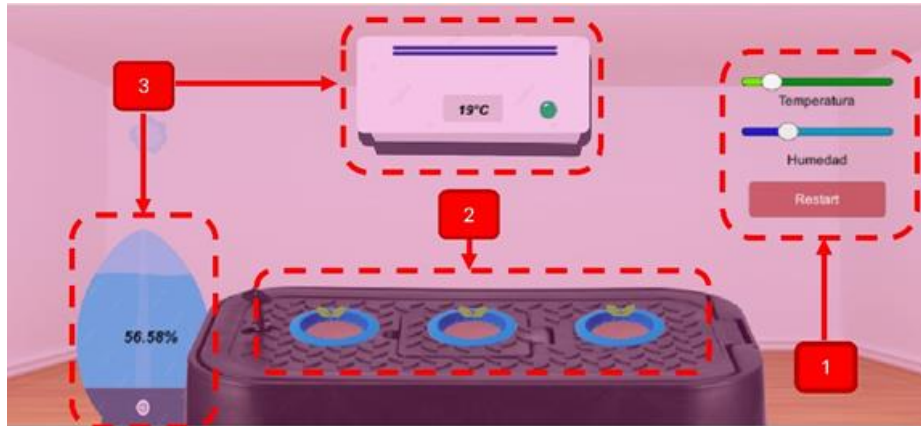


**Fig. 4.** Experimento realizado en cultivos interior para la obtención de valores óptimos de variables ambientales.

### 3. Metodología

Se propone el desarrollo de un modelo digital de tres lechugas aeropónicas, utilizando el motor gráfico Unity. Este modelo permitirá a los usuarios ingresar la temperatura y la humedad deseada, y observar cómo es afectado el crecimiento de las lechugas, facilitando la comprensión temprana de cómo estas variables influyen en el desarrollo de cultivos en interiores. En la metodología desarrollada en este proyecto de investigación están involucradas varias etapas, que, en conjunto, logran el objetivo en común, en este caso es el tener un modelo digital de una lechuga aeropónica.

El desarrollo del modelo digital se realizó utilizando el motor gráfico de Unity, ya que cuenta con la facilidad de tener una amplia documentación y el uso del lenguaje de programación C#. El modelo digital está basado en un prototipo de una cámara de crecimiento vegetal que se encuentra en el Tecnológico Nacional de México en Celaya. En la Fig. 1 se observa un diagrama de bloques con las etapas de la metodología propuesta.



**Fig. 4.** Secciones del Modelo digital: Entrada de datos (1), visualización del estado de las lechugas (2), visualización numérica de los valores ingresados (3).

### 3.1. Variables de entrada

Por medio de revisión bibliográfica, se encontró que existen cuatro variables principales que influyen en el crecimiento de una planta: temperatura, humedad relativa en el ambiente, nivel de luminosidad y nivel de dióxido de carbono en el ambiente.

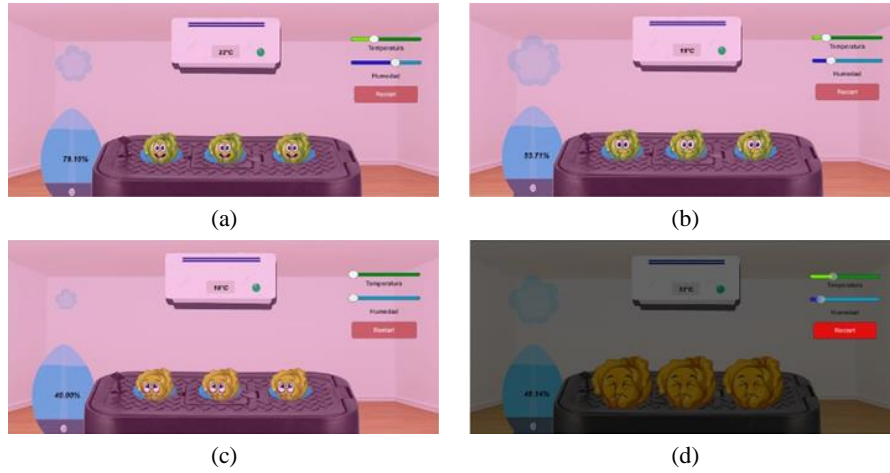
Debido a que en el modelo físico de la cámara de crecimiento no se encuentra controlado el nivel de dióxido de carbono, esta variable fue descartada al momento de realizar el modelo digital. El nivel de luminosidad presente en la cámara de crecimiento se mantuvo constante a  $216 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  con un fotoperiodo de 12 hrs, esta acción fue representada en el modelo digital por medio de una luz intermitente. Para la obtención de los valores de temperatura y humedad relativa ingresados por el usuario, se utilizaron deslizadores en la pantalla, con la finalidad de que el modelo digital sea didáctico, teniendo estos como límites la temperatura y la humedad relativa mínima y máxima que el prototipo físico puede representar.

### 3.2. Ecuaciones

En la tabla 1, se presentan los rangos de valores de las variables: temperatura y humedad relativa, para los cuales la lechuga tiene un correcto crecimiento. Los valores registrados fueron encontrados en literatura y comprobados con experimentación. Mediante software se realizaron ajustes lineales y parabólicos a los datos experimentales recopilados, se obtuvieron las ecuaciones que comparan las variables de temperatura y humedad relativa contra un factor decrecimiento de la lechuga, siendo un cero el factor mínimo de crecimiento y uno el factor máximo esperado:

$$\text{Factor de crecimiento por temperatura} = \frac{(\text{temperatura} - 26)^2}{-84} + 1.19, \quad (1)$$

$$\text{Factor de crecimiento por temperatura} = -0.07 \times \text{temperatura} + 2.5, \quad (2)$$



**Fig. 5.** Modelo digital en funcionamiento mostrando lechugas en estado óptimo (a), estado saludable (b), estado poco saludable (c), estado seco (d).

$$\text{Factor de crecimiento por humedad} = \frac{(\text{humedad} - 70)^2}{-800} + 1.13, \quad (3)$$

$$\text{Factor de crecimiento por humedad} = -0.05 \times \text{humedad} + 5. \quad (4)$$

La ecuación 1 se utiliza cuando la temperatura ingresada por el usuario es menor o igual a 22° C, mientras que la ecuación 2 se emplea cuando la temperatura supera ese valor, de igual manera la ecuación 3 se aplica cuando la humedad relativa ingresada es menor o igual a 80%, mientras que la ecuación 4 se utiliza cuando este valor se ve superado.

### 3.3. Representación del crecimiento

Para la representación del crecimiento de la planta, ver Fig. 2, se emplearon 2 vistas gráficas principales. Se utilizó la velocidad de fotogramas para aumentar el tamaño de la vista gráfica, realizando una multiplicación de los factores de crecimiento de temperatura y humedad relativa seleccionados por el usuario y sumándolo al vector de escala en cada fotograma. Como se ve en la Fig. 2, la primera vista gráfica utilizada representa la plántula o parte inicial de la vida de la planta, cuando la altura de la plántula llega a un límite máximo, la vista gráfica se deshabilita y se habilita la segunda vista gráfica que simula la forma de una lechuga desarrollada. El crecimiento de la lechuga se detiene cuando iguala o supera el límite máximo.

### 3.4. Decisiones de visualización

Debido a que busca que el modelo digital sirva como modelo didáctico para el entendimiento temprano de cómo afectan las variables ambientales en el crecimiento de una planta en un ambiente controlado, se utilizan modificaciones a la representación

gráfica de la lechuga desarrollada, en conjunto con expresiones faciales, para denotar el estado de esta. Como se observa en la Fig. 3, se presentan cuatro estados de salud de la lechuga, el primero de ellos representa a una lechuga en estado óptimo (a), la cual experimentará un crecimiento excepcional. El estado (b) simboliza una lechuga saludable, la cual crecerá normalmente.

El tercer estado expresa una lechuga en un estado poco saludable (c), ya que no cuenta con las condiciones para desarrollarse, por lo cual su crecimiento será muy poco. Finalmente, el último estado, o estado seco (d), se mostrará en pantalla cuando el crecimiento máximo de la lechuga sea alcanzado en el estado poco saludable, representando que la lechuga se ha secado. Como se observa en la tabla 2, los estados se muestran en pantalla dependiendo del resultado de la multiplicación de los factores de crecimiento por temperatura y humedad relativa (FCTH).

#### 4. Resultados

Se realizaron 2 experimentos de cultivo interior con ambiente controlado con una duración de 30 días cada uno (ver Fig. 4), donde se pusieron a prueba los valores de las variables ambientales que producen un mejor comportamiento en el desarrollo de una lechuga, encontrados en la documentación, como se muestra en la Tabla 1, facilitando el desarrollo del modelo digital que se presenta. Para la obtención de los valores de temperatura y humedad se utilizó el sensor JXBS-3001-TH—RS conectado a una placa de desarrollo ESP8266, los datos son subidos a un servidor en la nube para su resguardo y visualización. Se tomaron los valores de temperatura y humedad que produjeron un mayor peso fresco en la lechuga.

Como se muestra en las Figuras 5 y 6, se desarrolló un modelo digital de tres lechugas aeropónicas el cual tiene una interfaz gráfica amigable con el usuario con el objetivo de que se genere un entendimiento de cómo afectan las variables ambientales en el desarrollo de una lechuga haciendo uso de los cuatro estados de salud programados. El modelo digital cuenta con tres secciones principales, la sección 1 se encuentran dos deslizadores para la selección de la temperatura y humedad relativa a la cual se realizará el experimento y un botón de reinicio por si se busca repetir la ejecución del modelo digital.

En la sección 2, se puede visualizar el crecimiento de la lechuga y el estado de salud. Finalmente, en la sección 3 se observa de manera numérica los valores de temperatura y humedad relativa ingresados por el usuario. Mientras se encuentre en ejecución la simulación del modelo digital, los deslizadores están habilitados para cambiar la temperatura y la humedad relativa ingresadas, mientras el botón de reinicio se encuentra deshabilitado. Como se muestra en la Fig. 9, cuando las lechugas llegan a su tamaño máximo, independientemente del estado de salud, los deslizadores se deshabilitan y el botón de reinicio se habilita.

#### 5. Conclusiones y trabajo a futuro

Los modelos digitales son herramientas muy útiles en muchas áreas, al ser representaciones computarizadas de sistemas físicos complejos, ya sea de agricultura,



ganadería, eléctrica, etc. Permiten realizar simulaciones, análisis y predicciones de manera eficiente y precisa, lo cual puede conllevar a mejoras significativas de los procesos. De igual manera se concluye que es posible la realización de modelos digitales didácticos los cuales ayudaran a un mejor entendimiento de los temas, sin la necesidad de realizar experimentación física y sin salir del hogar.

Durante el desarrollo del proyecto, el equipo mostró algunos inconvenientes para la ejecución del modelo digital, por lo que se sugiere el uso de un equipo de cómputo con características avanzadas. Como trabajo futuro, se planea sustituir las ecuaciones de comportamiento por algoritmos de aprendizaje automático, alimentándolos con una cantidad mayor de datos obtenidos de pruebas experimentales. Esto se debe a que el presente trabajo se llevó a cabo como un primer paso hacia la creación de un gemelo digital.

## Referencias

1. United Nations: World Population Prospects 2022. Department of Economic and Social Affairs Population Division. <http://population.un.org/wpp/> (2022)
2. Abbass, K., Qasim, M.Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., Younis, I.: A Review of the Global Climate Change Impacts, Adaptation, and Sustainable Mitigation Measures. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 28, pp. 42539–42559 (2022). DOI: 10.1007/s11356-022-19718-6.
3. Contreras, J.: Retos alimentarios 2030: Objetivos, recomendaciones... alternativas y realidades. *Journal of Behavior and Feeding*, vol. 1, no. 1, pp. 86–95 (2021). DOI: 10.32870/jbf.v1i1.18.
4. Fasciolo, B., Awouda, A., Bruno, G., Lombardi, F.: A Smart Aeroponic System for Sustainable Indoor Farming. In: *Proceedings of the Colloque International pour la Réduction des Coûts de Production*, vol. 116, pp. 636–641 (2023). DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.107.
5. International Society of Precision Agriculture: Precision Agriculture Definition. [www.ispag.org/about/definition](http://www.ispag.org/about/definition) (2024)
6. García-Segura, D.R., Valdez-Aguilar, L.A., Ramírez-Rodríguez, H., Zermeño-González, A., Cadena-Zapata, M.: Producción de mini tubérculos de papa en aeroponía en comparación con suelo y polvo de coco. *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 39 (2021). DOI: 10.28940/terra.v39i0.902.
7. Hati, A.J., Singh, R.R.: Smart Indoor Farms: Leveraging Technological Advancements to Power a Sustainable Agricultural Revolution. *AgriEngineering*, vol. 3, no. 4, pp. 728–767 (2021). DOI: 10.3390/agriengineering3040047.
8. González, J.P., Sanchez-Londoño, D., Barbieri, G.: A Monitoring Digital Twin for Services of Controlled Environment Agriculture. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 19, pp. 85–90 (2022). DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.188.
9. Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., Tekinerdogan, B.: Digital Twins in Greenhouse Horticulture: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 199, pp. 107183 (2022). DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183.
10. Van-der-Aalst, W.M.P., Hinz, O., Weinhardt, C.: Resilient Digital Twins: Organizations Need to Prepare for the Unexpected. *Business and Information Systems Engineering*, vol. 63, no. 6, pp. 615–619 (2021). DOI: 10.1007/s12599-021-00721-z.
11. Anthony-Howard, D., Ma, Z., Mazanti-Aaslyng, J., Norregaard-Jorgensen, B.: Data Architecture for Digital Twin of Commercial Greenhouse Production. In: *Research and Innovation in the Fields of International Conference on Computing and Communication Technologies*, pp. 1–7 (2020). DOI: 10.1109/rivf48685.2020.9140726.

*Raul O. Herrera-Arroyo, Juan J. Martínez-Nolasco, et al.*

12. Mokhtar, A., El-Ssawy, W., He, H., Al-Anasari, N., Sammen, S.S., Gyasi-Agyei, Y., Abuarab, M.: Using Machine Learning Models to Predict Hydroponically Grown Lettuce Yield. *Frontiers in Plant Science*, vol. 13 (2022). DOI: 10.3389/fpls.2022.706042.
13. Reyes-Yanes, A., Abbasi, R., Martinez, P., Ahmad, R.: Digital Twinning of Hydroponic Grow Beds in Intelligent Aquaponic Systems. *Sensors*, vol. 22, no. 19, pp. 7393 (2022). DOI: 10.3390/s22197393.
14. Jeong, D., Jo, S., Lee, I., Shin, H., Kim, J.: Digital Twin Application: Making a Virtual Pig House Toward Digital Livestock Farming. *IEEE Access*, vol. 11, pp. 121592–121602 (2023). DOI: 10.1109/access.2023.3313618.