

Aporte de la digitalización a la sostenibilidad de los sistemas de recirculación acuícola

Damián L. Castellini^a, Alicia Zanfrillo^{a,b}, Nahuel Zanazzi^a, Arturo Asiain^a

^aGrupo UTN de Investigación LACUI (Laboratorio de Acuicultura) de la Facultad Regional Mar del Plata de la Universidad Tecnológica Nacional, Av. Buque Pesquero Dorrego 281, C.P.: 7600, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina

^bFacultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes 3250, C.P.:7600, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina

alicia@mdp.edu.ar

Resumen

La producción de alimentos se inscribe actualmente ante grandes desafíos por los cambios en los patrones climáticos y el crecimiento de la población mundial, factores que inciden en el agotamiento de los recursos naturales e incrementan la vulnerabilidad inherente a las cadenas de suministro globales. En este escenario, la producción controlada de peces asume el reto de ofrecer una alternativa sostenible, con menor costo energético, hídrico y económico, así como un mayor rédito social por el acceso a oportunidades de empleo y garantías de una alimentación saludable. Conocidas las ventajas de la incorporación de tecnologías maduras y de avanzada en sistemas productivos y en entornos controlados en particular, por la disponibilidad de información sobre toda la cadena de producción, se asocian en los procesos verticales de estas unidades de cultivo plataformas digitales con dispositivos discretos a fin de obtener una visión integral del fenómeno en estudio en una hibridación del mundo físico y el digital.

El propósito del trabajo consiste en optimizar el cultivo de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) mediante la digitalización del proceso de producción con la adopción de tecnologías como el Internet de las Cosas (*IoT*) en un sistema de recirculación acuícola -SRA- del Grupo de Investigación Laboratorio de Acuicultura -LACUI- de la Facultad Regional Mar del Plata de la Universidad Tecnológica Nacional. Se adopta una metodología de desarrollo tecnológico, de tipo experimental, a través del diseño e implementación de un sistema de diferentes tipos de sensores conectados a un microcontrolador ESP32 el cual a través de una red WIFI se conecta a internet permitiendo el monitoreo de las variables de mayor incidencia en la determinación de eficiencia e impacto ambiental de la producción acuícola como temperatura y pH.

La digitalización del sistema de recirculación acuícola -SRA- implementado posibilitó la medición del consumo energético e hídrico, así como el acceso a métricas de desarrollo de la especie en un ambiente controlado según las variables mencionadas, posibilitando mayor efectividad en las actividades de control hacia un incremento en la supervivencia y crecimiento de los especímenes. Además, proveyó a la configuración de parámetros para avanzar en la adopción de tecnologías habilitadoras, en la búsqueda de una producción más rentable, eficiente y sostenible, que potencie su expansión en el país.

Palabras Clave: acuicultura - tecnologías habilitadoras - producción.

Introducción

El cambio climático constituye en la actualidad una de las amenazas más acuciantes para el desarrollo de la vida humana con consecuencias que van más allá de los efectos o alteraciones por causas antrópicas en el ambiente, sumando efectos sociales y económicos que suponen barreras para el bienestar de la población. Así como existe una asociación entre desarrollo económico y emisión de gases de efecto invernadero -GEI- de particular relevancia para los países desarrollados, por su parte el cambio climático resulta un elemento contributivo en la pérdida de competitividad de una nación por la pérdida de

biodiversidad, la emisión de GEI y el agotamiento de los recursos naturales [1]. El calentamiento global tiene en estos factores elementos que favorecen su incremento con un claro deterioro de la sostenibilidad y en detrimento de la seguridad alimentaria del país. A las problemáticas mencionadas se adiciona una creciente demanda de alimentos que hacia fines de la década tendrá una tasa de 1,3% anual, siendo esta generada por el aumento de la población mundial. Argentina no queda exenta de esta tendencia y la demanda sostenida de alimentos, junto con los desafíos planteados por el cambio climático, ejercen una presión adicional sobre la capacidad del país para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental [2].

La producción de alimentos a través de la acuicultura tiene en nuestro país un desarrollo incipiente, registrando en 2022 un total de 3687 toneladas [3], [4]. Esta producción controlada, con un reducido impacto ambiental posibilita además una gestión adecuada de residuos. La digitalización en este ámbito se refiere a la incorporación de tecnologías digitales para mejorar la eficiencia y garantizar la sostenibilidad de la producción. Como herramientas clave en el proceso de digitalización se pueden nombrar sensores y plataformas digitales que facilitan la automatización y el monitoreo en tiempo real [5]. Minimizar costos y mejorar la calidad del producto son dos objetivos que se persiguen con la digitalización y que obran como disparadores para favorecer el proceso de transformación digital de la industria [6].

El impacto de la nueva revolución industrial en la acuicultura, la industria 4.0 a través de las tecnologías habilitadoras como IoT, robótica, computación en la nube, *Big Data*, inteligencia artificial y fabricación aditiva entre otras, no ha sido tan profundo como en los sectores agrícola y manufacturero [7]. La aplicación de este conjunto de tecnologías a los procesos productivos y acuícolas en particular, ha ampliado las posibilidades para disponer el acceso a ingentes volúmenes de datos para el seguimiento y monitoreo de las actividades, así como la interconexión de dispositivos que permiten un control personalizado para minimizar la intervención humana y aumentar la eficacia en las operaciones, en la trazabilidad y en el consumo de recursos.

Las principales variables que afectan el desempeño productivo en cultivos acuícolas en trucha arcoíris en sistemas de recirculación son la temperatura, pH, oxígeno disuelto y la turbidez, siendo clave mantener estos parámetros dentro de un rango óptimo para la especie [8]. Dentro de las variables mencionadas, la temperatura y el pH del agua desempeñan un papel fundamental, ya que afecta directamente al metabolismo de los organismos acuáticos. Una temperatura fuera del rango óptimo puede disminuir la tasa de crecimiento y aumentar la susceptibilidad a enfermedades en los cultivos acuícolas. El pH del agua es otra variable crítica, ya que afecta la disponibilidad de nutrientes y puede influir en la toxicidad de ciertos compuestos [9].

El objetivo de este estudio es analizar la implementación de tecnologías habilitadoras para optimizar el cultivo de trucha arco iris en un SRA. Aportando a la industria acuícola en Argentina una herramienta para lograr una producción más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Materiales y métodos

La propuesta se llevó a cabo en el Laboratorio de Acuicultura, durante el mes de agosto del año 2023, sobre un preexistente sistema de recirculación acuícola, con el propósito de disponer de herramientas digitales, a través de tecnologías habilitadoras, para el monitoreo del cultivo de trucha arcoíris. Para el diseño e implementación del dispositivo de control en el SRA, se utilizaron las recomendaciones de los trabajos de [10], [11], [12] y [8]. El desarrollo tecnológico se funda en la interconexión de la tecnología para la evolución del ciclo completo de vida de la especie elegida con sensores inteligentes para el control de los parámetros que garantizan un crecimiento sostenible y de calidad [13].

Las variables ambientales recolectadas fueron la temperatura y pH, para esto se utilizó el sensor sumergible de temperatura Ds18b20 y a través del módulo PH-4502C se conectó un electrodo E201-BNC para registrar el valor de pH. Para monitorear el consumo eléctrico del SRA se utilizó un sensor ACS712 que soporta hasta 20 A, el mismo registró los consumos de una bomba centrífuga de 1 hp. Por otro lado, se calculó el volumen de agua que se utilizó diariamente durante el desarrollo de la experiencia

empleando un caudalímetro modelo YF-S201 con un rango de medición de 1 a 30 l/min. Para la obtención y procesamiento de los datos se utilizó el microcontrolador ESP32, a este dispositivo se le conectó una pantalla lcd 1602 Hd44780 para visualizar el estado del sistema y los parámetros ambientales.

La conexión del ESP32 se realizó a través de un protocolo WiFi, que permitió la transferencia de datos e información a través de Internet a una plataforma virtual, en el presente trabajo se utilizó *myDevices Cayenne*, para esto se siguieron las recomendaciones del trabajo de [14] y las especificaciones del proveedor [15]. En esta plataforma, se almacenan los datos y se presentan de manera visual para que el usuario pueda acceder a ellos desde cualquier lugar con conexión a internet. Se configuró un *dashboard* en la aplicación web para la visualización de las variables en tiempo real y se programaron distintas alarmas ante desviaciones de los valores de temperatura o pH por fuera de los rangos óptimos para la especie cultivada. Dicho rango en nivel de optimalidad, en las variables de temperatura y pH seleccionado según lo descrito en [16], para configurar el aviso de alarma a través de correo electrónico, fue de 10 a 18 °C y 6.5 a 8.5 para el pH.

El diseño del SRA se puede observar en la Fig. 1, el volumen total del sistema (tanques, decantadores, filtros mecánicos y filtro biológico) fue de 3500 litros. La toma de las variables se realizó en filtro biológico y el caudal de ingreso de agua fue medido en la toma de llenado del sistema.

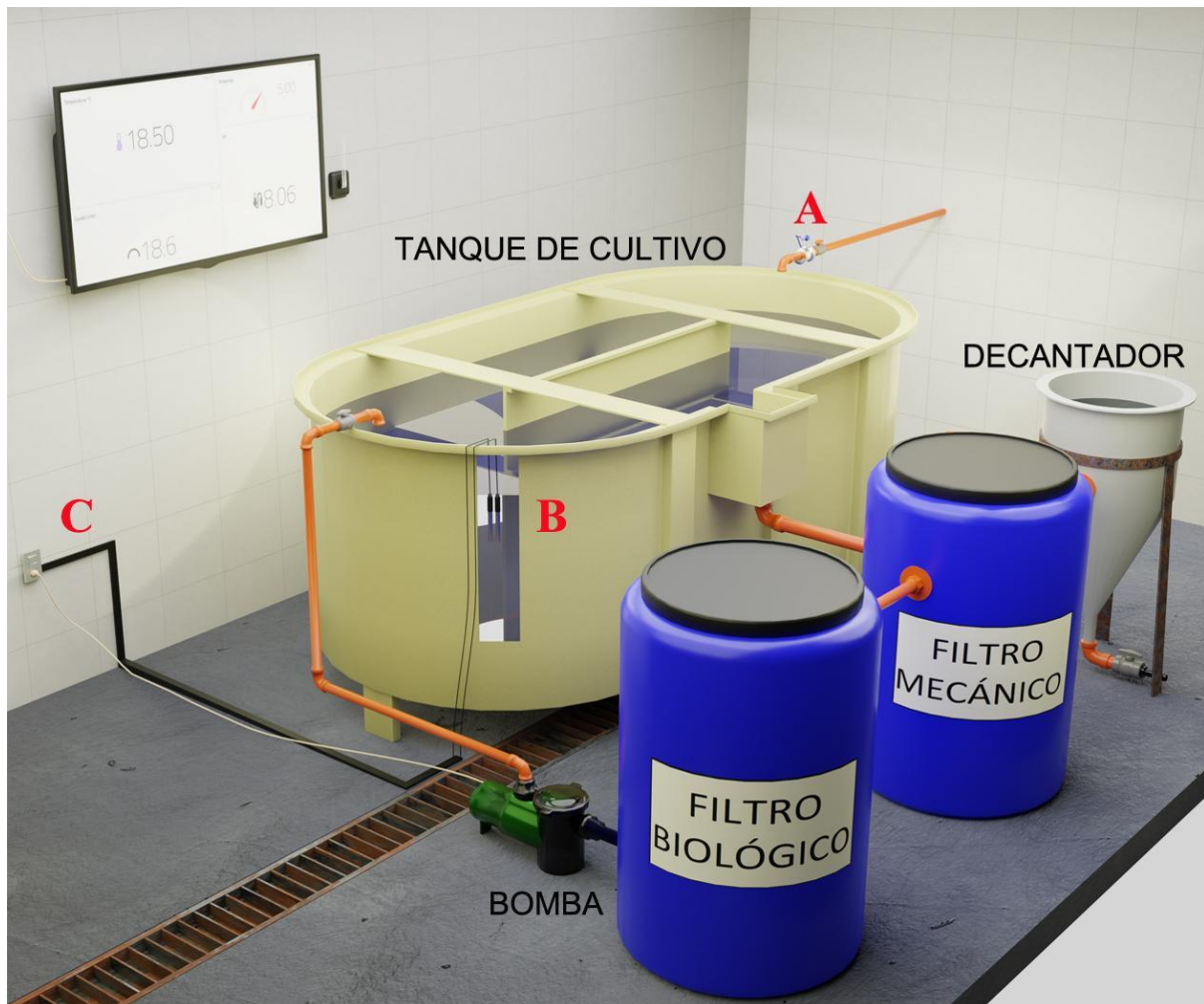


Fig. 1. Esquema del sistema de recirculación acuícola. A) sensor caudal de ingreso de agua; B) sensores de temperatura y pH; C) sensor de consumo eléctrico de la bomba centrífuga.

Resultados y discusiones

Se obtuvieron datos de temperatura, pH, consumo hídrico y eléctrico durante un periodo de 15 días. Los valores de temperatura y pH se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para la especie (Temperatura: $14^{\circ}\text{C}\pm 2$; pH: 8.1 ± 0.5). Con respecto al consumo hídrico se registraron dos picos en el ingreso de agua, correspondientes a los días que se realizó el recambio de agua para la eliminación de los desechos sólidos retenidos en los decantadores y filtro mecánico del SRA. Cada pico de consumo de agua representó aproximadamente un 9% del volumen total del sistema. Por otro lado, el consumo eléctrico se mantuvo en un promedio diario de 9.05 kW. Estos resultados preliminares nos muestran que la aplicación de tecnología de control puede llevarse a cabo a un bajo costo, y su utilización durante todo el proceso productivo nos brindaría datos importantes para determinar el costo por kilo vivo de la especie que se desee cultivar. También cabe aclarar que este tipo de dispositivos son versátiles y permiten mejoras continuas, en futuros diseños es clave incluir sensores de OD (oxígeno disuelto), TDS (sólidos totales disueltos) y un sistema de emergencia que permita energizar los elementos claves del cultivo en caso de un corte de luz.

En la actualidad la incorporación de nuevas tecnologías como el Internet de las cosas (IoT siglas en inglés) para la gestión y operación de granjas acuícolas está notoriamente limitada por distintos factores: económicos, sociales o la falta de conocimiento entre otros [17], [5]. Esto genera un gran problema al tratar de implementar una producción eficiente y sustentable, además de no poder alcanzar mayores niveles de producción a menores costos [5]. La información obtenida en este trabajo nos permite tener un control y registro más eficiente del consumo energético e hídrico, permitiendo realizar estimaciones más precisas en los costos de producción. De la misma manera al tener un monitoreo en tiempo real del sistema de cultivo mejora nuestra respuesta a situaciones que resulten estresantes o letales para nuestro cultivo, aumentando la productividad del mismo.

Conclusiones

El cambio climático representa una amenaza significativa para la seguridad alimentaria en Argentina y a nivel global. El aumento en la demanda de alimentos debido al crecimiento de la población mundial ejerce una presión adicional en un contexto de cambio climático, lo que requiere un enfoque sostenible y eficiente en la producción de alimentos. Este reto encuentra en la digitalización un vehículo para dotar de una solución respetuosa del ambiente y una oportunidad para ofrecer información en tiempo real que posibilite una mayor eficiencia y medición de desempeño.

La acuicultura en Argentina presenta un desarrollo incipiente, con un registro de producción de 3687 toneladas en 2022. Esto sugiere un gran potencial de crecimiento en la producción de alimentos a través de la acuicultura para satisfacer la creciente demanda de alimentos en el país.

La digitalización se presenta como una herramienta clave en la producción acuícola, permitiendo la automatización y el monitoreo en tiempo real. Esta tecnología tiene como objetivo minimizar costos y mejorar la calidad de los productos, lo que puede impulsar la transformación digital de la industria acuícola en Argentina, además, promover una mayor difusión de este tipo de producción. El control de las variables ambientales como la temperatura y el pH son fundamentales para el desempeño productivo en la acuicultura. Mantener estos parámetros dentro de rangos óptimos es esencial para el crecimiento sostenible de las especies cultivadas y la prevención de enfermedades.

Las tecnologías digitales permiten mantener con mayor precisión los parámetros críticos del ciclo de vida de las especies en cultivo, instalando una cultura centrada en la disponibilidad de un volumen ingente de datos que permita anticipar y predecir los aspectos fundamentales del desarrollo de estas especies. La aplicación de estas tecnologías a la cadena de valor de la acuicultura traza un camino a través del efectivo uso de recursos y garantiza transparencia en las operaciones junto con una mayor productividad por la detección temprana de anomalías y optimización en los costos de funcionamiento.

Bibliografía

- [1] González, N. Z., Olvera, R. E. M. y Reza, I. R. (2020). El cambio climático: un obstáculo ambiental y económico en el agotamiento de los recursos naturales para el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria. *RILCO DS: Revista de Desarrollo sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*, 2(11), 9.
- [2] Ministerio de Economía de la Nación. (2023). *Argentina Productiva 2030. Misión 6. Adaptar la producción de alimentos a los desafíos del siglo XXI. Plan para el Desarrollo Productivo, Industrial y Tecnológico - Ministerio de Economía de la Nación.*
- [3] Carciofi, I., & Rossi, L. (2021). *Acuicultura en Argentina: red de actores, procesos de producción y espacios para el agregado de valor. búsqueda del impulso exportador para los productos acuícolas.* Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación, ISSN, 2718-8124.
- [4] FAO (2023). *Estadísticas de pesca y acuicultura. Producción mundial de acuicultura 1950-2021 (FishStatJ).* In: FAO División de Pesca y Acuicultura [en línea]. Roma. Actualización 2021. www.fao.org/fishery/es/statistics/software/fishstatj.
- [5] Rastegari, H., Nadi, F., Lam, S. S., Abdullah, M. I., Kasan, N. A., Rahmat, R. F., & Mahari, W. A. W. (2023). Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends. *Smart Agricultural Technology*, 100187.
- [6] Pajo, J.F., Haukø, M., Skaret-Thoresen, R., Gonzalez, A., Lehne, P.H. y Grøndalen, O. (2023). *Digitalization in the Aquaculture Industry: Validation Trials over a Commercial 5G Network.* 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Gotemburgo, Suecia, 520-525, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188310.
- [7] Mustapha, U. F., Alhassan, A. W., Jiang, D. N., & Li, G. L. (2021). Sustainable aquaculture development: a review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA). *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2076-2091. <https://doi.org/10.1111/raq.12559>
- [8] dos Santos, T. A., Gomes de Freitas, F., Carvalho Gonçalves, D. L., & Fernández-Ramírez, L. M. (2022). Diseño IoT y validación de sistema de medida para generación fotovoltaica. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (28), 44-52.
- [9] Boyd, C. E. (2017). General relationship between water quality and aquaculture performance in ponds. In *Fish diseases* (pp. 147-166). Academic Press.
- [10] Trejo Ponte, E. W. (2014). *Diseño de automatización del laboratorio de acuicultura del IMARPE mediante un SCADA.* Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima, 51 pp.
- [11] Flores Mollo, S., & Aracena Pizarro, D. (2018). Sistema de monitoreo remoto de acuicultura en estanques para la crianza de camarones. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26, 55-64.
- [12] Piamba-Mamian, T. M., Zambrano, L. E., Montañón-Ruales, L. A., & Rojas-González, F. A. (2021). Implementación de un sistema de monitoreo IoT aplicado a una piscicultura de trucha. *Informador técnico*, 85(1), 3-19.
- [13] Lima, A. C., Royer, E., Bolzonella, M., & Pastres, R. (2022). Digital twins for land-based aquaculture: A case study for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Open Research Europe*, 2.
- [14] Padilla, J. E. M. (2017). Encendido y apagado de un Foco con atenuación desde cayenne y un módulo ESP 8266.
- [15] Cayenne. (2023). https://cayenne.mydevices.com/cayenne/forum_login.

[16] Recalde, D. (2014). Manual práctico para el cultivo de Trucha arco iris. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 44.

[17] Valladão, G. M. R., Gallani, S. U., & Pilarski, F. (2018). South American fish for continental aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 10(2), 351-369.