

Sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua para la conservación ex-situ de especies de género *ambystoma*.

Bucio Barrera Oscar Daniel, Cazares Cruz Jeremy Sajid, Guerrero Pérez Brandon Josué, Morales Rodríguez Úrsula Samantha, Rodríguez Jordán Gabriel de Jesús

Escuela Superior de Cómputo I.P.N. México D.F.

Tel. 57-29-6000 ext. 52000 y 52021. E-mail: obuciob1600@alumno.ipn.mx, jcazaresc1600@alumno.ipn.mx, bguerrerop1600@alumno.ipn.mx

Resumen --- El presente trabajo terminal consiste en el desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del agua en ajolotarios que conservan especies de género *Ambystoma* en peligro de extinción o sujetas a protección especial de manera ex – situ. Mediante sensores y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), el sistema mide en tiempo real los parámetros fisicoquímicos más importantes para la calidad del agua. Los datos se procesan en la nube y generan alertas automáticas enviadas a los cuidadores vía dispositivos móviles. Esto permite una respuesta rápida de los cuidadores para mantener condiciones óptimas, garantizando la supervivencia y bienestar de los ajolotes. El sistema facilita el monitoreo continuo y la toma de decisiones informadas.

Palabras clave --- Sensores, calidad del agua, Internet de las cosas, ambystoma, sistema de monitoreo, parámetros fisicoquímicos.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un factor crucial para el bienestar de los ajolotes, especies pertenecientes al género *Ambystoma*, endémicas de México, principalmente del Valle de México. Estos anfibios son altamente sensibles a toxinas y variaciones en su entorno acuático, siendo considerados bioindicadores de la buena calidad del agua de los cuerpos donde habitan [1]. Una mala calidad del agua puede afectar significativamente su salud, comportamiento y su capacidad única de regeneración [1]. Actualmente, de las 16 especies que habitan en México, 11 están sujetas a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010 [2]. Conforme a los planes de conservación del gobierno federal, específicamente el Programa de Conservación de Especies en Riesgo (PROCER), es esencial conservar estas especies tanto in-situ como ex-situ [2].

Un error común que conlleva a la muerte prematura de los ajolotes es la creencia errónea de que no requieren cuidados intensivos. Aunque son animales resistentes y con baja propensión a enfermedades, es fundamental disponer de un acuario bien equipado que incluya un filtro eficiente (con filtrado mecánico, químico y biológico), aireador y refrigerador, ya que los ajolotes necesitan agua fría para mantenerse saludables [3]. Dado que son especies 100% acuáticas, la calidad del agua es la característica más importante, ya que, como todos los anfibios, pueden absorber por la piel sustancias nocivas presentes en el agua. Para mantener una óptima calidad del agua, es necesario medir parámetros fisicoquímicos como pH, dureza, nitritos, nitratos, amonio, CO₂, porcentaje de oxígeno y cloro, entre otros [4]. Es importante considerar que, en sistemas de filtración tipo cascada, la alta tasa de evaporación requiere reposición frecuente del agua [4]. En algunos ajolotarios de la Ciudad de México se han documentado muertes de ejemplares sin conocer la causa específica, lo que podría haberse evitado mediante un sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos [5].

En el Parque Ecoturístico Michmani, el alcalde de Xochimilco, José Carlos Acosta, destacó la importancia del ajolote tanto para la cultura nacional como para la ciencia, y subrayó la necesidad de esfuerzos continuos para recuperar la especie después de siglos de deterioro [6]. En la zona lacustre se encuentran 70 ajolotarios que han contado con la participación de investigadores de la UNAM, UAM y la Universidad de Kent de Inglaterra, así como expertos de Cuba y Japón [6]. Sin embargo, ninguno de estos ajolotarios dispone de un sistema de monitoreo automático de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua.

Existen criaderos especializados en la reproducción en cautiverio de ajolotes, conocidos como Unidades de Manejo para la Conservación y Aprovechamiento Sustentable de la Vida Silvestre (UMAs) [7]. Estas UMAs pueden ser de tipo extensivo (en vida libre o

silvestre) o intensivo (en cautiverio o confinamiento). Las UMAs intensivas encargadas del cuidado y la conservación de los ajolotes permiten una reproducción controlada, manejo sanitario y repoblación en su hábitat natural, asegurando el mantenimiento adecuado de las condiciones en cautiverio [8].

Sin embargo, muchas UMAs y ajolotarios carecen de sistemas automáticos de alertamiento. Solo algunos cuentan con sistemas de automatización para el mantenimiento del agua, como equipos de aire acondicionado, filtros y bombas de aire comerciales, además de realizar actividades manuales como cambios totales de agua mensuales y limpieza de hábitats. Por ejemplo, el Parque Zoológico Benito Juárez mide rutinariamente los parámetros fisicoquímicos del agua utilizando kits específicos, pero estas mediciones son manuales [9]. La ausencia de sistemas automáticos de monitoreo implica que, en caso de fallas o presentarse parámetros imprevistos, los ajolotes quedarían expuestos a condiciones peligrosas.

Actualmente, no existen sistemas de monitoreo y alertamiento diseñados específicamente para ajolotes. No obstante, existen prototipos como el “prototipo para el monitoreo automatizado de parámetros de calidad del agua en una granja de camarón”, que podrían adaptarse para optimizarse para el uso exclusivo de ajolotes. Este prototipo utiliza sensores de oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica y temperatura, transmitiendo la información de calidad del agua inalámbricamente a una computadora personal [10].

Para abordar este desafío, la tecnología moderna del Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una herramienta valiosa para la conservación ex-situ de ajolotes. Dispositivos electrónicos interconectados a través de IoT pueden monitorear continuamente parámetros críticos como pH, temperatura y niveles de oxígeno disuelto en los ecosistemas artificiales de los ajolotes. La implementación de esta tecnología permite alertar a los cuidadores ante cualquier desviación de los niveles óptimos, y en algunos casos, ajustar automáticamente las condiciones para mantener un ambiente saludable. Por ejemplo, sensores instalados en laboratorios de investigación o en hogares de entusiastas pueden enviar datos a aplicaciones móviles o plataformas en línea, asegurando un monitoreo constante y una respuesta inmediata ante problemas, garantizando así la salud de los ajolotes. La aplicación de IoT en la conservación de ajolotes ejemplifica cómo la tecnología puede ser utilizada para proteger la biodiversidad y preservar

especies en peligro de extinción, combinando prácticas tradicionales de cuidado con innovaciones del siglo XXI.

II. METODOLOGÍA

La metodología usada para realizar el sistema de monitoreo fue la metodología en V [11], la metodología en V define los procedimientos de gestión de la calidad que lo acompañan y describe cómo pueden interactuar estas fases individuales entre sí. Fue concebida los años 70 como una especie de desarrollo posterior del modelo de cascada y su nombre se debe a su estructura, que se asemeja a la letra V.

En la figura 1 se muestra un diagrama que la metodología en V.

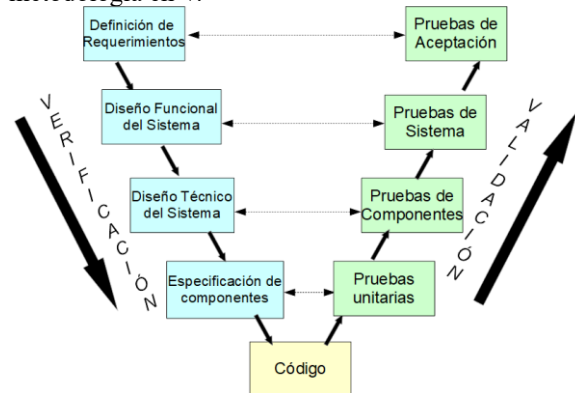


Figura 1. Diagrama de la metodología en V

Se eligió esta metodología ya que minimiza los riesgos y mejora la planificación del desarrollo del sistema, además de facilitar la detección de errores a etapas tempranas ya que después de cada fase de desarrollo se harán pruebas, esto ayudará a tener un buen control en el estado del sistema de monitoreo y evitará errores fatales en entregas.

FASES DE DESARROLLO (IZQUIERDA DE LA “V”)

Esta fase corresponde a la definición de requisitos y análisis del sistema.

Requisitos del sistema

Requisitos funcionales del sistema

- Integrar sensores capaces de medir los parámetros fisicoquímicos del agua: pH, Total de Sólidos Suspendidos, Total de Sólidos Disueltos, oxígeno disuelto y temperatura.

- Integrar sensores capaces de realizar mediciones continuamente o en intervalos preestablecidos (en este caso 30 min).
- Crear una plataforma o aplicación que muestre las lecturas en tiempo real de cada sensor.
- Presentar una visualización gráfica (gráficos de línea/tendencia) de la evolución de los parámetros con el tiempo.
- Proveer opciones para definir y ajustar los rangos óptimos de cada parámetro.
- Almacenar las mediciones de los sensores en una base de datos centralizada para análisis y respaldo de datos.

Requisitos no funcionales

- Desarrollar una plataforma web intuitiva y fácil de usar, evitando que los cuidadores dediquen demasiado tiempo a la capacitación.
- Implementar un sistema de monitoreo con sensores confiables y precisos en sus mediciones.
- Implementar alertas en tiempo y forma, asegurando que las desviaciones sean atendidas rápidamente.
- Desarrollar un sistema compatible con dispositivos móviles.
- Proteger a los sensores y componentes electrónicos del agua y de las condiciones adversas del ajolotario.
- Garantizar que la integridad y seguridad de la base de datos no tenga pérdidas o haya manipulación indebida de la información.

Diseño del sistema

El sistema constará de cuatro componentes principales:

- Sensores: Estos dispositivos estarán sumergidos en el agua y serán responsables de medir los parámetros fisicoquímicos. Estarán conectados a un módulo central que recopilará y procesará los datos.
- Módulo Central de procesamiento: Este módulo recopilará los datos de los sensores, los procesará y los enviará a la plataforma de monitoreo. También será responsable de enviar alertas en caso de desviaciones.
- Plataforma de Monitoreo: Esta será una aplicación o plataforma web que mostrará las lecturas en tiempo real, gráficos de tendencia y permitirá a los cuidadores definir y ajustar los rangos óptimos. También recibirá y mostrará alertas.

- Base de datos: Está nos ayudará a tener un control de los datos de forma ordenada, mandando la información pertinente a cada usuario dependiendo de su labor de cuidado.

El diagrama de la figura 2 proporciona una visión general de cómo se interconectan los diferentes componentes del sistema y cómo fluye la información entre ellos.

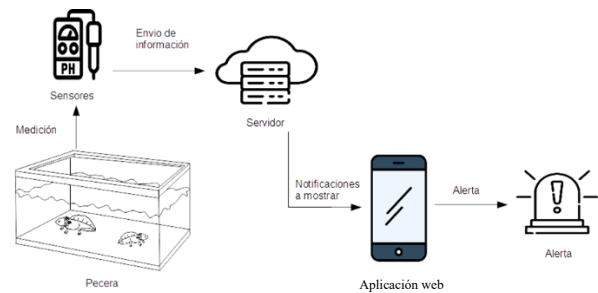


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema

Implementación del sistema

1. Sensores y módulo de adquisición de datos:

Se diseñó un módulo específico para alojar y conectar los sensores. Este módulo garantiza una correcta conexión y alimentación de cada sensor, además de protegerlos de posibles daños externos haciendo uso de un gabinete diseñado en Fusion360 especialmente para las medidas de estos sensores, este gabinete se pudo obtener haciendo uso de una impresora creality ender 3 v3 ke.

El dispositivo electrónico de adquisición de datos funciona con una tarjeta de desarrollo Arduino uno R4 WiFi, la cual obtiene y procesa los datos recopilados de los 5 sensores seleccionados para este sistema, en la figura 3 se muestra la arquitectura de este módulo de adquisición de datos.

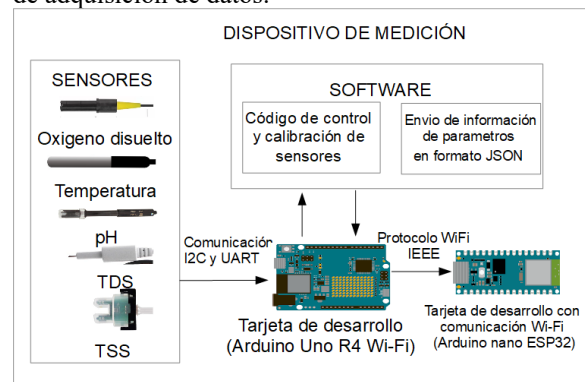


Figura 3. Dispositivo de adquisición de datos.

2. IoT y Conexión:

El dispositivo de adquisición de datos se conecta y envía a internet los datos recopilados de los sensores en formato json a una tarjeta de desarrollo Arduino nano esp32 a través del protocolo WiFi, el Arduino nano enviará los datos en formato json al servidor en la nube (Azure IoT) a través del protocolo MQTT, permitiendo la transmisión segura (esto a través del uso de tokens SAS generados dinámicamente) y en tiempo real de los datos recopilados.

3. Base de datos:

Se implementó PostgreSQL como el sistema de gestión de bases de datos, desplegado en Vercel. Esta elección se complementa con el uso de Prisma como Object-Relational Mapping (ORM), lo cual facilita el mapeo y la manipulación de datos entre la base de datos relacional y el modelo de objetos en la aplicación. Prisma fue seleccionado por su eficiencia en la generación de consultas y su capacidad de adaptación a esquemas modernos, lo que lo hace idóneo para proyectos ágiles y en constante evolución.

4. Software y plataforma de monitoreo:

El diagrama de la figura 4 ilustra la arquitectura del sistema de monitoreo de calidad del agua como una PWA en Vercel, el tipo de Arquitectura es Serverless, ya que toda la aplicación y bases de datos estará alojada en la nube de Vercel. Esto permite tener un punto centralizado para los datos sin deber tener en cuenta la infraestructura de la aplicación. La interfaz, creada con NextJS auxiliándose de HTML, CSS, Tailwind, interactúa con un back-end basado en NextJS (API Routes), Node.js. Por ultimo las alertas fueron enviadas a través de la aplicación telegram directo al número de celular del usuario de la plataforma.

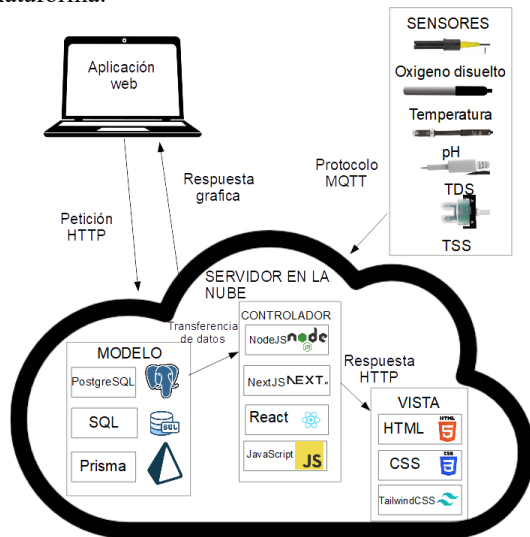


Figura 4. Diagrama de la arquitectura del sistema.

Pruebas de integración

Las pruebas de integración tienen como objetivo verificar que diferentes módulos o servicios del sistema trabajen correctamente cuando se integran entre sí. Para el sistema de monitoreo de la calidad del agua para ajolotes, las pruebas que se realizaron fueron las siguientes:

- Prueba de comunicación de Sensor al dispositivo de adquisición de datos:

Para verificar que cada sensor enviaba datos correctamente al dispositivo de adquisición de datos, se sumergió cada sensor en una solución con valores conocidos para verificar que el Arduino uno R4 WiFi lea y procese estos valores correctamente.

- Prueba de Alertas del Módulo Central de Procesamiento o el dispositivo de adquisición de datos:

Para asegurar que el Arduino Uno pudiera detectar cuando los valores leídos fueran diferentes a los óptimos, se simulaban valores fuera del rango ideal y se verificaba que el Arduino Uno generará una alerta.

- Prueba de Módulo Central de Procesamiento-Plataforma de Monitoreo:

En esta prueba se verificó que el Arduino Uno pudiera enviar datos a la pagina web de monitoreo y que esta reciba y muestre correctamente los datos. Para lograr esto se hizo que el Arduino uno envíe datos ficticios y se verificó que se mostraran correctamente en la página web.

- Prueba de Alertas en la Plataforma de Monitoreo:

En la prueba para que el Arduino uno envíe una alerta y la plataforma de monitoreo la reciba y la notifique al usuario a través de telegram, se simulo una alerta desde el dispositivo de adquisición de datos y se verificó que la plataforma de monitoreo notifique al usuario, nuevamente, a través de telegram.

- Prueba de Calibración de Sensores:

Para esta prueba se verificó que los sensores puedan ser calibrados correctamente a través del sistema, para lograr esto se utilizaron soluciones de calibración con valores conocidos y se ajustaron los valores que otorgan los sensores a través de la programación de la tarjeta de desarrollo Arduino uno y verificar los valores hasta que marquen los datos correctos.

- Prueba de Durabilidad de los Sensores en el Agua:

Se debe de asegurar que los sensores funciones correctamente incluso después de estar sumergidos en agua durante un periodo prolongado, así que para esta prueba se dejaron los sensores sumergidos en el agua por un tiempo prolongado, en nuestro caso un día entero y se verifico que los sensores continuaron funcionando correctamente.

- Prueba de Conexión a la página web: Para verificar que la página web funciona correctamente se accedió a la página web simultáneamente desde diversos dispositivos (PC y dispositivos móviles) y se verifico que se pudiera visualizar y operar correctamente.

FASES DE PRUEBA (DERECHA DE LA “V”)

Pruebas del Sistema:

- Objetivo: Se comprobó que el sistema completo, incluyendo hardware y software, funcionaron de manera integral y cumplieron los requisitos del sistema.
- Simulación de Entorno Real: El sistema finalizado fue llevado a un ajolotario ubicado en Santo Domingo Ajoloapan, donde el sistema se estuvo tomando mediciones de la calidad del agua durante un día entero.
- Prueba de Funcionalidad: Se verificó que todos los sensores midieran y muestren los datos en la plataforma correctamente. Además, se aseguró que las alertas se generaran y enviaran correctamente cuando los valores se encontraban fuera de los rangos óptimos.
- Prueba de Resistencia: El sistema pudo funcionar de manera continua durante largos períodos de tiempo sin fallos.
- Prueba de Interfaz: La interfaz es amigable con el usuario y fácil de usar.

Validación y Verificación:

- Objetivo: El sistema cumple con todos los requisitos y es apto para su uso previsto.
- Revisión de Requisitos: Se compararon las funcionalidades del sistema con los requisitos iniciales para asegurar que todos se hayan implementado correctamente.
- Pruebas con Usuarios: Se invitó a los cuidadores del ajolotario de Santo Domingo Ajoloapan a usar el sistema y recopilar sus comentarios y feedback. Esto con el fin de validar que el sistema es útil y apto para su propósito.

- Documentación: Se aseguró que se proporcionó toda la documentación necesaria, incluyendo manuales de usuario, guías de calibración de sensores y procedimientos de alerta.

Entrega y Mantenimiento:

- Objetivo: Se entregó un sistema funcional al cliente y se garantizó su operación continua.
- Instalación: Se instaló el sistema en el ajolotario del cliente (Santo Domingo Ajoloapan), asegurando que todos los sensores estuvieran correctamente posicionados en el gabinete y que la plataforma de monitoreo estuviera accesible.
- Capacitación: Proporcionar formación a los cuidadores o al personal encargado sobre cómo usar el sistema, cómo interpretar los datos y cómo actuar en caso de alertas.
- Mantenimiento Preventivo: Establecer un calendario para revisar y calibrar los sensores regularmente, así como para actualizar el software si es necesario.

III. RESULTADOS

El sistema de monitoreo basado en IoT demostró una alta precisión en la medición de pH, oxígeno disuelto, TDS, TSS y temperatura en tiempo real, con errores mínimos de 0.1 unidades de pH y $\pm 1\%$ en oxígeno disuelto. Las pruebas de conectividad confirmaron una comunicación estable mediante Wi-Fi y MQTT con Azure IoT Hub, sin pérdidas de datos. La plataforma web permitió una visualización intuitiva y la generación precisa de alertas, accesibles desde dispositivos móviles. Las pruebas de integración aseguraron una sincronización eficiente entre sensores, módulo central y plataforma, garantizando operaciones fluidas. En conjunto, el sistema cumplió con los requisitos establecidos, mejorando la gestión de la calidad del agua para la conservación ex-situ de ajolotes.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos para la conservación ex-situ de ajolotes demostró ser una solución viable y efectiva para mantener condiciones óptimas en hábitats controlados. El sistema, basado en Internet de las Cosas (IoT), logró medir con precisión pH, oxígeno disuelto, TDS, TSS y temperatura en tiempo real, cumpliendo con los objetivos de crear una herramienta robusta, precisa y

adaptable. Se observó que algunos ajolotes toleran variaciones mayores a las estipuladas por la norma CONAGUA-004, lo que sugiere la necesidad de ajustar los rangos óptimos según las características individuales de los ejemplares.

Durante el desarrollo, se enfrentaron desafíos significativos relacionados con el uso de sensores patentados, cuya disponibilidad y costos eran limitados, además de requerir mantenimiento específico. La calibración de los sensores también representó un reto, ya que se tuvo que adaptar a condiciones reales mediante validaciones manuales y con instrumentos de referencia. La conexión con Azure IoT Hub fue optimizada utilizando Arduino NANO ESP32 y Arduino Uno R4 WiFi, asegurando una comunicación estable y escalable, aunque se presentaron limitaciones en la compatibilidad de voltajes.

A pesar de estos desafíos, la integración de sensores con tecnologías Arduino y una aplicación web permitió desarrollar un sistema funcional que garantiza la salud y bienestar de los ajolotes. El sistema demostró eficiencia en la generación de alertas en tiempo real y en la visualización de datos históricos, ofreciendo una herramienta confiable para biólogos, investigadores y cuidadores.

V. RECONOCIMIENTOS

Los Autores agradecen a la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido y las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo terminal.

VI. REFERENCIAS

- [1] Ardiaca, M., Montesinos, A. Cuidados del ajolote mexicano [Online]. Available: <https://cvsaucos.com/cuidados-del-ajolote/>
- [2] Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2018, 13 de septiembre). Programa de Conservación de Especies en Riesgo (PROCER) [Online]. Available: <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programa-de-conservacion-de-especies-en-riesgo>
- [3] El ajolote: cuidado y mantenimiento [Online]. Available: <https://clanicano.es/ajolote/>
- [4] Mena, H., Sérvin, E. (2014, 10 de febrero). Manual básico para el cuidado en cautiverio del axolote de Xochimilco (*Ambystoma mexicanum*) [Online]. Available: http://www.ibiologia.unam.mx/barra/publicaciones/m anual_axolotes.pdf
- [5] Agencia Reforma. (2019, 18 de julio). Preocupa la muerte de 14 ajolotes en parque Azcapotzalco [Online]. Available: <https://www.debate.com.mx/cdmx/Preocupa-la-muerte-de-14-ajolotes-en-parque-Azcapotzalco-20190718-0020.html>
- [6] López, J. (2022, 16 de febrero). Alcaldes se comprometen a preservar el ajolote en CDMX [Online]. Available: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/alcaldes-se-comprometen-a-preservar-el-ajolote-en-cdmx/1498992#:~:text=Inform%C3%B3%20que%20en%20la%20zona,expertos%20de%20Cuba%20y%20Jap%C3%B3n>
- [7] SEMARNAT. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. [Online]. Available: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- [8] Ahedo, C. (2019). Diseño y planeación de una Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) intensiva de axolote mexicano (*Ambystoma mexicanum* Shaw y Nodder 1798) [Online]. Available: <http://132.248.9.195/ptd2019/abril/0787938/0787938.pdf>
- [9] Yarto, E., Citaku, I., González, V., Rangel, J. (2020). MANEJO Y CUIDADOS PARA AJOLOTES (*A. mexicanum*, *A. andersoni*, *A. dumerilii*) BAJO CUIDADO HUMANO EN EL PARQUE ZOOLOGICO BENITO JUÁREZ [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342283537_MANEJO_Y_CUIDADOS_PARA_AJOLOTES_A_mexicanum_A_andersoni_A_dumerilii_BAJO_CUIDADO_HUMANO_EN_EL_PARQUE_ZOOLOGICO_BENITO_JUAREZ#:~:text=,Los%20nitritos%20son%20gene
- [10] Olivio, M., Verduzco, J., Garcia, N., Villalobos, J., Olivio, A. (2018, 26 de enero). Prototipo para el monitoreo automatizado de parámetros de calidad del agua en una granja de camarón [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61458109001>
- [11] (2020, 28 de septiembre). ¿Qué es el modelo V? [Online]. Available: <https://www.ionos.mx/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/modelo-v/#:~:text=Las%20ventajas%20del%20modelo%20V,=Optimizaci%C3%B3n%20de%20la&text=Minimizaci%C3%B3n%20de%20riesgos%20y%20mejor.de%20la%20calidad%20firmemente%20integradas.>