



Universidad Autónoma Chapingo

DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN
MULTIPLATAFORMA BASADA EN CIENCIA
CIUDADANA PARA EL MONITOREO DE LLUVIA
EN EL MONTE TLÁLOC**

TESIS PROFESIONAL

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN IRRIGACIÓN

PRESENTA:

LUIS EMILIO ÁLVAREZ HERRERA

Chapingo, México, junio de 2025

Grupo A



Esta Tesis, Titulada “**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN MULTIPLATAFORMA BASADA EN CIENCIA CIUDADANA PARA EL MONITOREO DE LLUVIA EN EL MONTE TLÁLOC**” fue realizada por el C. Luis Emilio Álvarez Herrera. Bajo la dirección de la Dra. Teresa Margarita González Martínez, asesorada por el M.c Luis Tonatiuh Castellanos Serrano. Ha sido revisada y aprobada por el siguiente comité revisor y jurado examinador, como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN IRRIGACIÓN

PRESIDENTE	<hr/> DRA. TERESA MARGARITA GONZÁLEZ MARTÍNEZ
SECRETARIO	<hr/> M.C. FRANCISCO GARCÍA HERRERA
VOCAL	<hr/> M.C. BERNARDINO CRUZ CARDONA
SUPLENTE	<hr/> DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ
SUPLENTE	<hr/> M.C. LUIS TONATIUH CASTELLANOS SERRANO

Chapingo, México, Junio de 2025

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de mi vida, he recorrido senderos llenos de desafíos, aprendizajes y gratitud. Hoy, al culminar esta etapa académica, deseo dedicar este trabajo a quienes han sido el faro y la brújula en mi viaje.

A mi mamá **María Carolina Herrera Díaz** y a mi papá **Agustín Álvarez Bautista**, cuyos sacrificios y amor incondicional me han dado la fortaleza para alcanzar mis metas. Ustedes me enseñaron que la educación es el legado más valioso y que el esfuerzo constante siempre rinde frutos. Cada paso que doy es un reflejo de su dedicación y valores inculcados. Mamá, papá, esta tesis es tan suya como mía.

A mis abuelos **Laura Díaz Cruz - Mamá Aya**, **Mario Herrera Munguía - Papá Gogo[†]**, **Luisa y Agustín**, guardianes de la sabiduría y el cariño eterno. Aunque algunos ya no estén físicamente, sus enseñanzas y amor permanecen vivos en mi corazón. Sus historias y consejos me han guiado en los momentos más difíciles, dándome el coraje para persistir y superar obstáculos.

A mis hermanos **Paulo Elías Fernández Herrera**, **Alan Yareth Álvarez Zarco** y **Aranza Ailín Álvarez Zarco**, incondicionales de aventuras y desafíos. Gracias por ser mi apoyo en los días grises y mi celebración en los días de triunfo. Su confianza en mí ha sido una fuente de motivación constante.

A mis profesores **Humberto López Chimil[†]**, **Fernando Chávez León[†]**; a mis mentores **Luis Tonatiuh Castellanos Serrano**, la **Dra. Teresa González Martínez**, que con su sabiduría y paciencia han encendido en mí la llama del conocimiento. Sus enseñanzas han trascendido las aulas y han dejado una huella imborrable en mi formación personal y profesional. Gracias por creer en mi potencial y por inspirarme a ser mejor cada día.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, que me llevó tan lejos como a Japón, Chile y todo México.

Finalmente, dedico esta tesis a Dios, porque él me dio la voluntad de perseverar a pesar de las adversidades, por cada noche en vela y cada instante de duda superado. Este logro es el resultado de años de esfuerzo y dedicación, me recuerda que los sueños se alcanzan con determinación y pasión. Gracias a todos los que han sido parte de este viaje. Esta tesis es una manifestación de tu amor, apoyo y fe en mí.

DATOS BIOGRÁFICOS

Luis Emilio Álvarez Herrera nació el 7 de junio de 2002 en Texcoco de Mora, Estado de México. Ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo en 2017 y se incorporó al Departamento de Irrigación en 2020. Durante su formación académica, realizó un intercambio en la Universidad de Agricultura de Tokio, Japón (2023) y efectuó sus prácticas profesionales en Ecosuelo Lab, en Santiago Chile (2025).

Fue miembro del Programa de Formación de Nuevos Investigadores (PROFONI) de 2021 a 2025. Es autor de tres libros: *Fundamentos de la Ingeniería en Irrigación* (ocho volúmenes), *Matemáticas del Cubo Rubik* y *Huertos Agroecológicos*.

Entre 2017 y 2022, se dedicó a la docencia de matemáticas en el Colegio Euro Texcoco, como asistente del maestro Fernando Chávez León. Se desempeñó como consejero departamental de la Preparatoria Agrícola en 2018; en 2020, nuevamente fue consejero, ahora en el Departamento de Irrigación; Y como presidente del Club de Ciencias Netzahualpilli de 2019 a 2022.

Actualmente, es CEO del proyecto *Miyotl: Aprende una lengua indígena*, CTO de *Tláloc App: Ciencia ciudadana para el monitoreo de lluvia en el Monte Tláloc* (COLPOS) y CEO de la *Olimpiada Mexicana de Agronomía*.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
DATOS BIOGRÁFICOS	III
LISTA DE CUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Contexto geográfico del Monte Tláloc	2
1.3. Justificación	3
1.4. Hipótesis	3
1.5. Contribuciones de este trabajo	4
1.6. Esquema de la tesis	4
1.7. Alcance y limitaciones del estudio	5
2. OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo General	6
2.2. Objetivos Específicos	6
3. REVISIÓN DE LITERATURA	7
3.1. Definición de términos clave	7
3.2. Acceso a datos meteorológicos de zonas de montaña en México	9
3.3. Revisión de estudios previos sobre monitoreo ciudadano meteorológico	9
3.4. Tecnologías actuales en monitoreo climático	10
3.4.1. Pluviómetros con IoT	10

3.4.2.	Estaciones meteorológicas	10
3.4.3.	Aplicaciones móviles	10
3.4.4.	Importancia hidrológica de las zonas de montaña	10
3.5.	Aportes del monitoreo ciudadano a la ciencia climática	10
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	11
4.1.	Materiales	11
4.1.1.	Materiales físicos	11
4.1.2.	Infraestructura tecnológica virtual	11
4.2.	Métodos	12
4.2.1.	Protocolo de monitoreo participativo:	12
4.2.2.	Desarrollo del código	12
4.2.3.	Evaluación del nivel de maduración tecnológica	14
5.	RESULTADOS	15
5.1.	Protocolo de monitoreo participativo:	15
5.2.	Desarrollo del código	15
5.3.	Evaluación del nivel de maduración tecnológica	15
6.	CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO	16
6.1.	Aportes de la tesis al monitoreo ambiental	16
6.2.	Limitaciones encontradas	16
6.3.	Posibilidades de expansión a otras zonas	16
6.4.	Trabajo futuro:	16
6.4.1.	App offline	16
6.4.2.	IA para detección de anomalías	16
6.4.3.	Predicción climática	16
6.4.4.	Comunidad activa de usuarios:	16
	LITERATURA CONSULTADA	17
A.	ANEXO 1.	19

LISTA DE CUADROS

LISTA DE FIGURAS

3.1. Colectaros adecuados para los pluviómetros según la norma NMX-AA-166/1-SCFI-2013 (Secretaría de Economía (SE), 2013)	9
---	---

RESUMEN

Recientes esfuerzos en ciencia ciudadana han demostrado el valor de las aplicaciones móviles para el monitoreo ambiental distribuido. En esta tesis, se presenta el desarrollo de Tlálloc App, una aplicación multiplataforma basada en Flutter, diseñada para registrar y analizar datos de precipitación pluvial en el Monte Tlálloc, utilizando la participación activa de los usuarios. La plataforma integra tecnologías como Firebase Realtime Database para almacenamiento en tiempo real, Google Play Console para su despliegue en Android, y algoritmos personalizados para el cálculo de mediciones reales basadas en el estado de vaciado de pluviómetros. El enfoque modular de desarrollo incluye una experiencia de usuario adaptable y escalable. Los resultados obtenidos demuestran que Tlálloc App facilita la recolección sistemática de datos meteorológicos de forma económica y participativa, con posibilidades de expansión a otras regiones. Esta investigación propone un nuevo modelo de colaboración entre ciencia ciudadana y tecnología móvil en entornos de alta variabilidad climática.

Palabras-Clave: Ciencia ciudadana, monitoreo de lluvia, Aplicaciones móviles.

ABSTRACT

Recent efforts in citizen science have demonstrated the value of mobile applications for distributed environmental monitoring. This thesis presents the development of Tlálloc App, a cross-platform application built with Flutter, designed to record and analyze rainfall data at Monte Tlálloc through active user participation. The platform integrates technologies such as Firebase Realtime Database for real-time data storage, Google Play Console for Android deployment, and custom algorithms for calculating real measurements based on rain gauge statuses. The modular development approach includes a scalable and adaptable user experience. Results show that Tlálloc App enables systematic, low-cost, and participatory meteorological data collection, with potential expansion to other regions. This research proposes a new model of collaboration between citizen science and mobile technology in areas with high climatic variability.

Key-Words: Citizen science, Rainfall monitoring, Mobile application

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las montañas actúan como barreras orográficas que obligan a las nubes a elevarse y enfriarse, lo que genera precipitaciones más abundantes en comparación con los valles circundantes. Sin embargo, la medición de estas lluvias en zonas montañosas suele ser limitada debido a su difícil acceso y a la falta de vigilancia para el mantenimiento de instrumentos de medición (Aparicio Mijares, [1992](#)). Esta situación es crítica en ecosistemas como los bosques, donde la información sobre precipitación resulta fundamental para su conservación y manejo. Los bosques templados de montaña, como los del Monte Tláloc en México, enfrentan múltiples desafíos, entre ellos la deforestación, la fragmentación del hábitat y los efectos del cambio climático. Este último ha generado alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura, impactando negativamente la biodiversidad, los ciclos hidrológicos y los servicios ecosistémicos que estos bosques proporcionan (González y col., [2016](#)).

Actualmente el ejido tiene participación en los programas forestales con 1628 hectáreas de superficie forestal en Monte Tláloc y ante la CONAFOR se tienen registradas 248 hectáreas para aprovechamiento forestal (Nava, G. 2014). Según (López, L. 2023), en el Monte Tláloc, las extracciones por nivel altitudinal parecen estar relacionadas con la elevada mortalidad de árboles en las categorías más pequeñas, sin embargo, la intensidad y nivel de extracción de madera no parecen representar una amenaza que ponga en riesgo la viabilidad poblacional de *Abies religiosa*; la categoría diamétrica más pequeña parece beneficiarse de las aperturas debidas a las extracciones. El cambio climático repercute de diferente manera en el crecimiento de los bosques de montaña en los extremos altitudinales de su distribución; así como su relación con el proceso de migración de fauna, y finalmente los ecosistemas terminan siendo amenazados (González, T. 2021).

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una aplicación móvil y web que facilite el monitoreo de la precipitación en el Monte Tláloc mediante la participación activa de ejidatarios y otros grupos de interés. A través de esta herramienta tecnológica, se busca implementar una estrategia de ciencia ciudadana que permita registrar, analizar y visualizar datos de lluvia, contribuyendo así a la gestión sostenible de los recursos naturales y la conservación de los bosques de montaña.

1.1 Planteamiento del problema

Ante la falta de datos sobre precipitación en estas zonas, se requiere el desarrollo de estrategias innovadoras que permitan superar las limitaciones técnicas y logísticas, involucrando a las comunidades locales en la generación y uso de información. Es necesario recurrir a estrategias que incorporen a la población en la generación de información y en su utilización para el manejo de los ecosistemas (Hubp, 1990).

En México, las redes oficiales de monitoreo hidrometeorológico, como las operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), presentan una cobertura limitada en muchas regiones de montaña, donde los microclimas pueden variar significativamente en distancias cortas.

El Monte Tláloc, ubicado en la zona montañosa del oriente del Valle de México, es un ejemplo de ello: su importancia ambiental, histórica y cultural contrasta con la escasa información climática precisa y en tiempo real disponible para la comunidad local, investigadores y tomadores de decisiones. Esta falta de datos puntuales dificulta la **gestión sustentable del agua**, la prevención de riesgos y el análisis del cambio climático a escala local.

Las aplicaciones disponibles para la recolección de datos meteorológicos suelen ser de uso profesional, poco accesibles o no están diseñadas para fomentar la participación ciudadana en contextos rurales o de baja conectividad. Esto genera una brecha entre el potencial de colaboración ciudadana y las herramientas disponibles para lograrlo.

Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar una aplicación multiplataforma intuitiva, accesible y robusta, que aproveche el poder de la ciencia ciudadana para llenar los vacíos de información sobre la precipitación en el Monte Tláloc. Dicha aplicación debe facilitar la recolección, visualización y validación de datos por parte de usuarios no expertos, promoviendo la generación de conocimiento colectivo, la educación ambiental y la participación activa de la comunidad en temas de gestión hídrica y climática.

1.2 Contexto geográfico del Monte Tláloc

El Monte Tláloc, es un volcán formado a partir de las capas de sucesivas erupciones basálticas fluidas; ubicado en el Eje Neovolcánico en el límite entre los municipios de Ixtapaluca y Texcoco al oriente del Estado de México. Forma parte de la Sierra Nevada y es el Área Natural Protegida “Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl” su ubicación hidrológica es al oriente de la cuenca de México. Con sus 4120 metros sobre el nivel del mar, el Tláloc es la novena cima más alta del país. Cuenta con un clima de montaña cuya designación oficial es semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (de Estadística y Geografía (INEGI), 2009).

1.3 Justificación

La ciencia ciudadana surge como una alternativa viable para enfrentar esta problemática, al involucrar a la población en la recopilación de datos y en la búsqueda de soluciones. A través de herramientas tecnológicas, como aplicaciones móviles y plataformas digitales, se facilita la recolección de información de manera accesible, eficiente y en tiempo real, promoviendo a su vez la educación ambiental y la colaboración social. Esta metodología no solo proporciona datos científicos valiosos, sino que también fortalece el vínculo entre la sociedad y la conservación de los ecosistemas.

Se identifica la necesidad de un instrumento accesible y participativo para la captura y envío de datos pluviales, que garantice la disponibilidad de la información obtenida para su análisis y toma de decisiones. Este instrumento debe ser sencillo de usar y estar diseñado específicamente para el público objetivo: los ejidatarios. Gracias a su conocimiento del territorio y su participación activa, los ejidatarios pueden convertirse en aliados estratégicos para la recolección continua y precisa de datos.

La aplicación desarrollada responde a esta necesidad mediante un diseño intuitivo que permite a usuarios con conocimientos tecnológicos básicos capturar y enviar información sobre precipitaciones de forma rápida y eficiente. Además, al integrar principios de ciencia ciudadana, se fomenta la colaboración activa de las comunidades locales, fortaleciendo su empoderamiento y compromiso con la conservación de los recursos hídricos.

Desde un enfoque técnico, el proyecto destaca por su carácter práctico y adaptable. La aplicación aprovecha tecnologías modernas para registrar datos de lluvia, optimizando la recopilación de información en tiempo real y reduciendo los costos asociados a los equipos de medición tradicionales. Al centralizar y analizar estos datos en una plataforma digital, se genera un repositorio confiable que puede ser utilizado por investigadores, autoridades locales y ejidatarios para la toma de decisiones fundamentadas.

Finalmente, la disponibilidad de esta información en un formato accesible y visualmente comprensible contribuye a sensibilizar a los usuarios sobre la importancia de monitorear los patrones de lluvia. Esto facilita su aplicación en estrategias de manejo hídrico, planificación agrícola y mitigación de riesgos climáticos. De este modo, el proyecto no solo ofrece una solución técnica, sino que también genera un impacto social y ambiental significativo.

1.4 Hipótesis

La implementación de una aplicación multiplataforma, basada en principios de ciencia ciudadana, mejora significativamente la precisión y frecuencia de los reportes de lluvia en la región del Monte Tláloc, al facilitar la participación activa de los habitantes locales mediante herramientas digitales accesibles e intuitivas; lo cual contribuye a la generación de datos meteorológicos complementarios a los obtenidos por estaciones profesionales, permitiendo una caracterización más detallada de los

eventos de precipitación en zonas de difícil acceso.

1.5 Contribuciones de este trabajo

Este trabajo de tesis contribuye al campo del desarrollo tecnológico, la ciencia ciudadana y la meteorología local mediante la creación de una aplicación multiplataforma diseñada específicamente para el monitoreo participativo de lluvia en el Monte Tláloc. La solución propuesta integra tecnologías móviles modernas con servicios en la nube y diseño centrado en el usuario, permitiendo que cualquier ciudadano pueda registrar datos de precipitación de manera sencilla, segura y estructurada. Esta contribución tiene un impacto directo en la generación de datos alternativos en regiones donde la infraestructura meteorológica es escasa o limitada, y donde los fenómenos hidrometeorológicos presentan comportamientos complejos.

Desde el punto de vista técnico, la tesis presenta una arquitectura modular desarrollada con Flutter, integrando funcionalidades clave como, sincronización con Firebase, visualización gráfica de estadísticas y un sistema para validar la veracidad de las mediciones con base en algoritmos desarrollados para la interpretación de datos de pluviómetros caseros. Se propone también una metodología de evaluación del nivel de maduración tecnológica (TRL) aplicada a aplicaciones de ciencia ciudadana, lo cual permite medir de forma objetiva el avance y aplicabilidad real del sistema desarrollado.

Además, este trabajo representa un esfuerzo por brindar el acceso a las tecnologías de monitoreo ambiental, empoderando a las comunidades rurales al integrarlas como agentes activos en la recolección de datos climáticos, al tiempo que fortalece los vínculos entre el conocimiento científico y la sabiduría local. Finalmente, se generan aportes a futuras investigaciones en temas relacionados con aplicaciones móviles para monitoreo ambiental, ciencia abierta y educación en contextos rurales, abriendo camino a iniciativas de colaboración interdisciplinaria entre desarrolladores, científicos, comunidades y tomadores de decisiones.

1.6 Esquema de la tesis

Este trabajo está estructurado de acuerdo con el proceso de investigación, desarrollo y validación de una aplicación multiplataforma basada en ciencia ciudadana para el monitoreo de lluvia en el Monte Tláloc. La introducción presenta el contexto y motivaciones del estudio, seguida de cinco capítulos que describen el planteamiento del problema, la metodología empleada, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas. La notación es consistente a lo largo del documento, y cualquier excepción está claramente indicada. La bibliografía acumulativa se presenta al final. A continuación, se ofrece una breve descripción de los capítulos.

- **Capítulo 1: Introducción** Presenta el planteamiento del problema, el contexto geográfico del Monte Tláloc, la justificación del proyecto, la hipótesis

de trabajo, las principales contribuciones de la tesis, el esquema general del documento y las limitaciones del estudio.

- **Capítulo 2: Objetivos** Define el objetivo general y los objetivos específicos que guiaron la realización de este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico.
- **Capítulo 3: Revisión de literatura** Revisa los conceptos clave necesarios para entender el proyecto, incluyendo el acceso a datos meteorológicos de zonas de montaña en México, estudios previos sobre monitoreo ciudadano, tecnologías actuales en monitoreo climático, y los aportes de la ciencia ciudadana al estudio climático.
- **Capítulo 4: Materiales y Métodos** Describe los materiales físicos utilizados, la infraestructura tecnológica virtual implementada, el protocolo de monitoreo participativo, el proceso de desarrollo de la aplicación Tláloc App, y la metodología empleada para evaluar su nivel de maduración tecnológica.
- **Capítulo 5: Resultados** Expone los principales hallazgos obtenidos del protocolo de monitoreo participativo, el desarrollo de la aplicación y la evaluación del nivel de maduración tecnológica alcanzado por la herramienta propuesta.
- **Capítulo 6: Conclusiones finales y trabajo futuro** Resume los aportes de la tesis al monitoreo ambiental, las limitaciones identificadas, las posibilidades de expansión de la aplicación a otras regiones y plantea líneas de trabajo futuro, incluyendo el desarrollo de una versión offline, integración de inteligencia artificial para detección de anomalías, predicción climática avanzada y la consolidación de una comunidad activa de usuarios.

1.7 Alcance y limitaciones del estudio

El principal alcance de este estudio es demostrar la viabilidad técnica de integrar la ciencia ciudadana y tecnologías móviles para fortalecer el acceso a datos meteorológicos en zonas de montaña, donde las redes oficiales presentan baja densidad.

El desarrollo de la aplicación incluye la recolección de datos mediante pluviómetros manuales, el registro georreferenciado de observaciones, el almacenamiento en bases de datos en la nube y la visualización de datos de manera intuitiva para los usuarios. Además, se evaluó preliminarmente el nivel de maduración tecnológica (TRL) de la herramienta.

Sin embargo, el estudio presenta limitaciones inherentes a su carácter exploratorio. La validación de los datos recopilados por los usuarios no fue exhaustiva, y la base de usuarios durante las pruebas piloto fue limitada en número y diversidad. Asimismo, las funcionalidades de descarga de estadísticas, algoritmos predictivos o de inteligencia artificial para la detección de anomalías quedaron identificadas como trabajo futuro, pero no fueron desarrolladas en esta primera fase.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Generar un instrumento tecnológico en forma de una aplicación multiplataforma que facilite la participación ciudadana en la recopilación de datos de precipitación y garantice el acceso abierto a esta información, fomentando la ciencia ciudadana en el Monte Tláloc

2.2 Objetivos Específicos

- Definir el protocolo de monitoreo participativo: Diseñar y establecer un protocolo claro y funcional para la recolección de datos de lluvia, utilizando una red de pluviómetros distribuidos estratégicamente en el Monte Tláloc, asegurando la precisión y confiabilidad de los datos recopilados.
- Desarrollar el código: Implementar el desarrollo de una aplicación móvil y una plataforma web que integren funcionalidades intuitivas, y herramientas interactivas que permitan a los usuarios registrar, consultar y analizar datos de precipitación de manera sencilla y segura.
- Evaluar el nivel de maduración tecnológica (Technology Readiness Level, TRL) de la aplicación desarrollada mediante el análisis de sus funcionalidades, estabilidad, precisión en la recolección de datos, rendimiento multiplataforma y experiencia del usuario, con el fin de determinar en qué etapa del desarrollo se encuentra y establecer su viabilidad para una implementación real en el entorno del Monte Tláloc, tomando como referencia la escala de TRL y utilizando pruebas piloto con participación ciudadana como evidencia de validación.

Capítulo 3

REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Definición de términos clave

En un sistemas meteorológico a pequeña escala, donde participa la formación de nubes del tipo cúmulus dependiendo la presencia de núcleos de condensación; Temperaturas cercanas a la del punto de rocío; Abasto continuo de vapor de agua; Incremento del tamaño de las gotas a través de colisiones; se pueden presentar diferentes fenómenos meteorológicos tales como la lluvia, el granizo, la nieve, las trombas, los tornados, los rayos y los truenos.

Definición 3.1 (Precipitación) *Es la caída de agua procedente de las nubes en estado líquido, sólido y semisólido (Breña, 2013).*

El monitoreo es fundamental para la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental y otros campos.

Definición 3.2 (Monitoreo) *Es un proceso sistemático y continuo que permite observar, registrar y analizar parámetros específicos para evaluar el estado o cambios en un sistema o fenómeno determinado. (de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM), 2014)*

Definición 3.3 (Ciencia Ciudadana) *Es una metodología científica que involucra activamente a la ciudadanía en la generación de conocimiento, permitiendo que personas sin formación científica formal participen en la recolección, análisis e interpretación de datos, contribuyendo así a proyectos de investigación y al fomento de la cultura científica. (de Investigaciones Científicas (CSIC), 2022)*

Definición 3.4 (Flutter) *Flutter es un framework de código abierto desarrollado por Google que permite crear aplicaciones nativas de alto rendimiento para múltiples plataformas (iOS, Android, web, escritorio) a partir de una única base de código, utilizando el lenguaje de programación Dart. (Stormacq, 2020)*

Definición 3.5 (Dart) *Dart es un lenguaje de programación desarrollado por Google, diseñado para crear aplicaciones frontend rápidas y optimizadas, especialmente utilizado en conjunto con Flutter. (Inc., 2024a)*

Definición 3.6 (Firebase) *Firebase es una plataforma de desarrollo de aplicaciones creada por Google que proporciona servicios como bases de datos en tiempo real, autenticación de usuarios, hosting de archivos y funciones de backend sin servidor, facilitando el desarrollo y escalamiento de aplicaciones móviles y web. (Inc., 2024b)*

Definición 3.7 (Backend) *El backend se refiere a la parte del desarrollo de software que gestiona la lógica de negocio, bases de datos, servidores y APIs, funcionando como la estructura interna que sostiene y conecta los servicios de una aplicación. (Education, 2020)*

Definición 3.8 (Frontend) *El frontend es la capa de una aplicación que interactúa directamente con el usuario, encargándose del diseño, la estructura y la experiencia visual mediante tecnologías como HTML, CSS y JavaScript o frameworks como Flutter para móviles. ((MDN), 2023)*

Definición 3.9 (Google Play Console) *Google Play Console es la plataforma de gestión que permite a los desarrolladores publicar, actualizar, monitorear el rendimiento y administrar la distribución de sus aplicaciones Android en la tienda Google Play. (Inc., 2024d)*

Definición 3.10 (Firebase Realtime Database) *Es un servicio de base de datos en la nube que almacena y sincroniza datos entre usuarios en tiempo real, ideal para aplicaciones que requieren actualizaciones inmediatas. (Inc., 2024c)*

Definición 3.11 (Pluviómetro manual) *El pluviómetro manual es un instrumento utilizado para medir la cantidad de precipitación líquida caída en un lugar específico durante un período determinado. Consiste en un recipiente cilíndrico que recoge el agua de lluvia, la cual se mide posteriormente con una probeta graduada. Este instrumento debe cumplir con las especificaciones establecidas en las normas mexicanas para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos. (de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2011)*

Las especificaciones para construir un pluviómetro, ilustradas en la figura 3.1, son las siguientes:

- El depósito debe tener una entrada estrecha, suficientemente protegida de la radiación, para reducir al mínimo las pérdidas de agua por evaporación
- Este instrumento debe colocarse en lugares abiertos y su área de captación debe permanecer horizontal y a 100 cm del suelo. (Secretaría de Economía (SE), 2013)

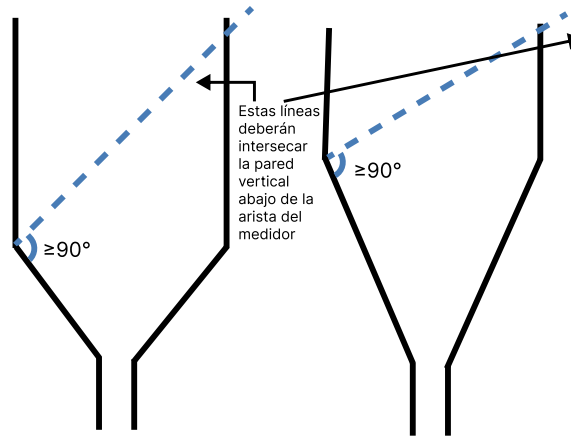


Figura 3.1: Colectaros adecuados para los pluviómetros según la norma NMX-AA-166/1-SCFI-2013 (Secretaría de Economía (SE), 2013)

3.2 Acceso a datos meteorológicos de zonas de montaña en México

3.3 Revisión de estudios previos sobre monitoreo ciudadano meteorológico

Un artículo publicado en RMetS por Samuel Michael Illingworth et al., titulado “Red de ciudadanos sobre precipitaciones del Reino Unido: un estudio piloto”, describe cómo se utilizó GoogleChart para llevar un registro colaborativo de las precipitaciones.(Illingworth y coauthors, 2021)

Por otro lado, el artículo “Enhancing Engagement of Citizen Scientists to Monitor Precipitation Phase” menciona la aplicación Mountain Rain or Snow, una colaboración financiada por la NASA entre Lynker, Desert Research Institute y la Universidad de Nevada-Reno. Esta aplicación permite a los usuarios reportar si está lloviendo o nevando en un momento y lugar determinados.(Lute y col., 2021)

En el contexto de África, el artículo “Evaluation of Factors Affecting the Quality of Citizen Science Rainfall Data in Akaki Catchment, Addis Ababa, Ethiopia” aborda los factores que influyen en la calidad de los datos sobre precipitaciones recolectados por científicos ciudadanos.(Tedla y col., 2022)

Asimismo, la aplicación iFlood, mencionada en el estudio “Coastal Flooding Generated by Ocean Wave- and Surge-Driven Groundwater Fluctuations on a Sandy Barrier Island”, tiene un enfoque similar, pero está diseñada específicamente para reportar inundaciones.(Elgar y col., 2021)

Otras iniciativas destacan el uso de la ciencia ciudadana para monitorear la calidad del agua y llenar vacíos de datos para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, como se describe en el artículo “Using Citizen Science to Understand River Water Quality While Filling Data Gaps to Meet United Nations Sustainable Development Goal 6 Objectives”.(McGinn y coauthors, 2021)

En un enfoque relacionado, el desarrollo de aplicaciones móviles para el monitoreo de aguas subterráneas también ha sido promovido como una herramienta para involucrar a la ciencia ciudadana, según se menciona en el estudio “Groundwater Mobile App Development to Engage Citizen Science”.(Dennis, [2019](#))

véase la figura 2 para ubicar sus categorías.

3.4 Tecnologías actuales en monitoreo climático

La implementación de herramientas tecnológicas para el monitoreo de fenómenos climáticos ha demostrado ser una estrategia eficiente, especialmente cuando se combina con enfoques de ciencia ciudadana. Este estudio, al fomentar la colaboración comunitaria y el uso de tecnologías accesibles, tiene el potencial de generar información crítica para el manejo de los ecosistemas de montaña.

3.4.1 Pluviómetros con IoT

3.4.2 Estaciones meteorológicas

3.4.3 Aplicaciones móviles

Entre los avances más destacados está el proyecto Cooperative Open Online Landslide Repository (COOLR), que utiliza las aplicaciones **Landslide Reporter** y **Landslide Viewer**. Estas herramientas invitan a científicos ciudadanos de todo el mundo a contribuir con reportes de eventos de deslizamientos de tierra, mejorando la investigación y predicción de desastres.Center, [2021](#)

Además, la aplicación **Sense-it** ofrece un kit de herramientas de sensores para la investigación ciudadana, funcionando como una herramienta educativa en dispositivos Android.van Joolingen y col., [2017](#)

Otra categoría importante son los diarios de lluvia, como la aplicación **Rain Tracker** de Callum Hill, que permite a los usuarios gestionar sus propios datos de precipitaciones, aunque estos no son accesibles al público. Hill, [2021](#)

Aplicaciones similares encontradas en el mercado de aplicaciones a junio de 2025, como **Pocket Rain Gauge**, **Rainlogger** y **Rain Recorder** registran las precipitaciones en función de la ubicación mediante GPS, pero tampoco ofrecen un sistema de registro público de los datos.

3.4.4 Importancia hidrológica de las zonas de montaña

3.5 Aportes del monitoreo ciudadano a la ciencia climática

Capítulo 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

4.1.1 Materiales físicos

- Se utilizaron pluviómetros calibrados con botellas graduadas de PET, instaladas en bases de metal y madera ubicadas en los sitios de monitoreo.
- Se utilizaron dispositivos móviles con cualquier tipo de sistema operativo, para realizar pruebas de la aplicación Tláloc App.

4.1.2 Infraestructura tecnológica virtual

- La aplicación se desarrolló utilizando el framework Flutter 3.0 (Dart SDK ≥ 2.17) con arquitectura multiplataforma, implementando Firebase como backend principal mediante los paquetes `cloud_firestore` (almacenamiento en tiempo real), `firebase_auth` (autenticación de usuarios) y `firebase_storage` (gestión de archivos multimedia).
- Para la gestión de estado se empleó `provider` junto con `flutter_riverpod`, asegurando reactividad en la visualización de datos pluviométricos.
- La interfaz gráfica se enriqueció con `syncfusion_flutter_charts` (gráficos interactivos de precipitación), `flutter_map` (georreferenciación con Leaflet.js), y `lottie` (animaciones en tiempo real).
- La integración con hardware móvil se logró mediante `mobile_scanner` (lectura de códigos QR en pluviómetros), `location` (geolocalización de reportes) y `image_picker` (captura de evidencias fotográficas).
- Se implementó persistencia local con `shared_preferences` para configuración de usuario y `connectivity_plus` para manejo de conexión offline y online.
- La internacionalización se gestionó con `intl` y `flutter_localizations`, soportando múltiples idiomas para la ciencia ciudadana global.

4.2 Métodos

4.2.1 Protocolo de monitoreo participativo:

Llevar a cabo un monitoreo de lluvia que involucró tres principales etapas esquematizadas en el sistema de la figura 4.

1.1. Procesos Participativos con Ejidatarios El primer paso consiste en establecer contacto con los miembros de la UEM para presentarles el proyecto y generar alianzas para su desarrollo. Posteriormente llevar a cabo talleres participativos con cada Ejido para identificar a las personas que potencialmente podrían participar en el monitoreo y los lugares para instalar sitios de monitoreo. Luego de visitar los lugares propuestos por los ejidatarios, registrar datos como coordenadas, altitud, pendiente, tipo de vegetación, superficie desprovista de árboles y tamaño de los árboles circundantes. Esta información permite identificar los sitios más adecuados para instalar los sitios de monitoreo, siguiendo las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2014). En una etapa posterior se realiza un proceso de capacitación con los Ejidatarios y público en general para el monitoreo de la lluvia. Asimismo, crear un protocolo para facilitar a los Ejidatarios el uso de la información generada en sus actividades de manejo de los bosques. 1.2. Diseño Técnico de Monitoreo Construir y calibrar pluviómetros con botellas de PET, siguiendo los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-166/1-SCFI-2013 (SE, 2013) y la Organización Meteorológica Mundial. La máxima capacidad de almacenamiento es de 153 mm y la escala tiene resolución de un mm, excepto por los primeros 5 mm que tienen resolución de 0.25 mm. Los pluviómetros se colocaron sobre bases de madera a un metro sobre el nivel del suelo. Para evitar pérdidas de agua por evaporación se utilizan 5 mm de aceite comestible vegetal por pluviómetro.

Los pluviómetros se vacían y registran por el equipo técnico con una frecuencia de un mes (más menos dos días), a menos que sea necesario vaciar con mayor frecuencia. Los participantes envían sus registros sin una frecuencia específica, por lo que sus observaciones son adicionales a las que realiza el equipo técnico. Cada estación de monitoreo cuenta con letreros que poseen la información necesaria para que las personas puedan participar aunque no se les haya dado una capacitación personal. Se cuenta con siete estaciones de monitoreo en un gradiente altitudinal que va de 2683 a 3870 m. 1.3. Campaña de difusión con público en general Contar con una campaña permanente de difusión entre la gente que sube a la montaña. Generar material gráfico instalado en campo que invite a la población a participar, trípticos y carteles que se colocan en lugares estratégicos. Utilizar redes sociales para dar a conocer el proyecto y mecanismos para premiar a los participantes activos con regalos.

4.2.2 Desarrollo del código

- Definición de requerimientos funcionales y no funcionales
- Análisis de usuario y contexto de uso
- Diseño de arquitectura de la aplicación

- Configuración inicial del proyecto Flutter
- Estructuración modular del proyecto por capas
- Implementación de navegación con GoRouter
- Configuración de internacionalización (i18n) con Flutter Intl
- Definición y aplicación de un sistema de theming personalizado
- Modelado de datos y definición de entidades
- Integración de Firebase Realtime Database
- Implementación de servicios de autenticación (Firebase Auth)
- Configuración de almacenamiento seguro local (Secure Storage)
- Desarrollo de lógica de negocio en el gestor de estado (AppState)
- Desarrollo de la UI responsiva basada en principios de Material 3
- Implementación de componentes reutilizables (widgets personalizados)
- Configuración de controladores de formularios y validaciones
- Conexión de capa de presentación con capa de datos
- Implementación de gráficos interactivos para estadísticas (bar charts)
- Gestión de errores y manejo de excepciones
- Pruebas unitarias y de widget
- Optimización de rendimiento y buenas prácticas de renderizado
- Implementación de control de versiones de la base de datos
- Preparación de la aplicación para despliegue (build y signing)
- Integración de anuncios mediante Google AdMob
- Publicación de la aplicación en Google Play Console
- Documentación técnica y guía de uso para usuarios

Programar una aplicación móvil y web denominada Tláloc App, disponible en <https://tlaloc.web.app/> y en Play Store, con el fin de enviar las mediciones a una base de datos pública, que cuente con las siguientes características: Registro: Los usuarios podrán crear una cuenta y elegir mediante el escaneo de códigos Qr el paraje o sitio de monitoreo. Menú Principal: Disponer de tutoriales, información del proyecto, mapas de las rutas de acceso a los pluviómetros y datos de contacto.

Envío: Campo para el registro de la precipitación, pluviómetro interactivo, booleano de vaciado, cambio de rol y paraje, fecha y hora de registro. Bitácora: Consulta, edita, comparte o elimina las mediciones.

En el sistema de pluviómetros existen tres actores: Usuario, Pluviómetro, multi-plataformas. El usuario es el actor principal que se interconecta en primera instancia con los códigos QR de cada paraje, de allí la comunicación entre una laptop, pc y el SmartPhone, el cual es seleccionada por el usuario y puede registrarse bajo el sistema operativo android, ios, huawei, web y windows. El siguiente diagrama (Figura 5) describe la forma operativa del comportamiento del flujo de información del sistema.

Figura 5. Diagrama de Flujo de Información del Sistema en Tlálloc App. (Autoría Propia)

4.2.3 Evaluación del nivel de maduración tecnológica

Capítulo 5

RESULTADOS

5.1 Protocolo de monitoreo participativo:

5.2 Desarrollo del código

5.3 Evaluación del nivel de maduración tecnológica

Capítulo 6

CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Aportes de la tesis al monitoreo ambiental

6.2 Limitaciones encontradas

6.3 Posibilidades de expansión a otras zonas

6.4 Trabajo futuro:

6.4.1 App offline

6.4.2 IA para detección de anomalías

6.4.3 Predicción climática

6.4.4 Comunidad activa de usuarios:

CÓMO MANTENER A LARGO PLAZO EL USO DE LA APP

LITERATURA CONSULTADA

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa. (Vid. pág. 1).
- Breña, A. (2013). *Principios y fundamentos de hidrología superficial* (1.^a). Universidad Autónoma Metropolitana. <https://casadelibrosabiertos.uam.mx/gpd-principios-y-fundamentos-de-hidrologia-superficial.html>. (Vid. pág. 7)
- Center, N. G. S. F. (2021). Cooperative Open Online Landslide Repository (CO-OLR). <https://gpm.nasa.gov/landslides/about.html>. (Vid. pág. 10)
- de Estadística y Geografía (INEGI), I. N. (2009). Texcoco, México [Archivado desde el original el 28 de mayo de 2016. Consultado el 16 de octubre de 2016. Se observa que el Tláloc está incorrectamente citado como Cerro El Mirador", el cual es un pico secundario del macizo del Tláloc.]. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15092>. (Vid. pág. 2)
- de Investigaciones Científicas (CSIC), C. S. (2022). *Guía breve sobre Ciencia Ciudadana*. CSIC. https://www.csic.es/sites/default/files/2023-06/guia_ciencia_ciudadana_csic_2022.pdf. (Vid. pág. 7)
- de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM), C. (2014). *Manual para la implementación de programas de monitoreo*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://publicaciones.ciga.unam.mx/index.php/ec/catalog/book/68>. (Vid. pág. 7)
- de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), S. (2011). *Manual teórico práctico del observador meteorológico de superficie*. Gobierno de México. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001679.pdf>. (Vid. pág. 8)
- Dennis, R. (2019). Groundwater Mobile App Development to Engage Citizen Science. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 239, 103-113. <https://doi.org/10.2495/WS190101> (vid. pág. 10)
- Education, I. C. (2020). *What is Backend?* [Consultado en abril de 2025]. <https://www.ibm.com/cloud/learn/backend>. (Vid. pág. 8)
- Elgar, S., Raubenheimer, B., Dickhudt, P. J., McNinch, J. E., Plant, N. G. & List, J. H. (2021). Coastal Flooding Generated by Ocean Wave- and Surge-Driven Groundwater Fluctuations on a Sandy Barrier Island. *Journal of Hydrology*, 603, 126920. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126920> (vid. pág. 9)
- González, P., Neilson, R. P. & Lenihan, J. M. (2016). Global patterns in biodiversity and climate change. *Nature*, 402(6761), 335-338 (vid. pág. 1).

- Hill, C. (2021). Rain Tracker [Aplicación disponible en Google Play Store]. <https://play.google.com/store/apps/details?id=ccahill.com.au.raintracker>. (Vid. pág. 10)
- Hubp, J. L. (1990). El relieve de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(1), 82 (vid. pág. 2).
- Illingworth, S. M. & coauthors. (2021). Red de ciudadanos sobre precipitaciones del Reino Unido: un estudio piloto [Información adicional no disponible en los resultados de búsqueda.]. *Royal Meteorological Society* (vid. pág. 9).
- Inc., G. (2024a). *Dart Programming Language* [Consultado en abril de 2025]. <https://dart.dev/>. (Vid. pág. 7)
- Inc., G. (2024b). *Firestore* [Consultado en abril de 2025]. <https://firebase.google.com/>. (Vid. pág. 8)
- Inc., G. (2024c). *Firestore Realtime Database* [Consultado en abril de 2025]. <https://firebase.google.com/products/realtime-database>. (Vid. pág. 8)
- Inc., G. (2024d). *Google Play Console* [Consultado en abril de 2025]. <https://play.google.com/console/about/>. (Vid. pág. 8)
- Lute, A. C., Mahoney, C. A., Newman, A. J., Livneh, M. A., Clow, D. W. & Raleigh, M. A. (2021). Enhancing Engagement of Citizen Scientists to Monitor Precipitation Phase. *Frontiers in Earth Science*, 9, 617594. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.617594> (vid. pág. 9)
- McGinn, D. & coauthors. (2021). Using Citizen Science to Understand River Water Quality While Filling Data Gaps to Meet United Nations Sustainable Development Goal 6 Objectives. *Science of The Total Environment*, 786, 147466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147466> (vid. pág. 9)
- (MDN), M. D. N. (2023). *Front-end web developer* [Consultado en abril de 2025]. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Front-end_web_developer. (Vid. pág. 8)
- Secretaría de Economía (SE). (2013). Norma Mexicana NMX-AA-166/1-SCFI-2013. Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. Parte 1: especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales [Consultado en abril de 2025]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166835/nmx-aa-166-1-scfi-2013_1_.pdf. (Vid. págs. 8, 9)
- Stormacq, S. (2020). *Flutter: Desarrolle sus aplicaciones móviles multiplataforma con Dart*. ENI Editions. <https://www.amazon.com/-/es/Flutter-Desarrolle-aplicaciones-m%C3%B3viles-multiplataforma/dp/2409032575>. (Vid. pág. 7)
- Tedla, H. Z., Haile, A. T., Walker, D. W., Gebreyesus, W., Alamirew, T. & Dadi, M. (2022). Evaluation of Factors Affecting the Quality of Citizen Science Rainfall Data in Akaki Catchment, Addis Ababa, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 612, 128284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128284> (vid. pág. 9)
- van Joolingen, W., de Jong, T., Strijbos, J.-W. & Strijbos, J.-W. (2017). The Sense-it App: A Smartphone Sensor Toolkit for Citizen Inquiry Learning. *International Journal of Science Education*, 39(17), 2349-2369. <https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1382522> (vid. pág. 10)

Apéndice A

ANEXO 1.