**Aplicación multiplataforma basada en ciencia ciudadana para el monitoreo de lluvia en el Monte Tláloc**

**Resumen**

**Introducción:** 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.

**Objetivo:** 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

**Metodología:** Se empleó una metodología mixta que incluyó: diseño participativo con ejidatarios locales, desarrollo ágil de software en Flutter con Firebase, validación funcional en campo, y evaluación del nivel de madurez tecnológica mediante el modelo TRL.

**Resultados:** La aplicación permitió recopilar más de 1700 mediciones reales, todas georreferenciadas y almacenadas en la nube, con funcionalidades para visualización gráfica, exportación en PDF/Excel y trazabilidad completa.

**Limitaciones del estudio:** La verificación de mediciones reportadas depende de que los usuarios sigan el protocolo

**Originalidad:** ofrecer una solución replicable y de bajo costo para el monitoreo de lluvia desde una lógica colaborativa, integrando tecnología móvil, y ciencia ciudadana.

**Conclusiones:** Tláloc App alcanzó un nivel TRL 8 y se proyecta como una herramienta escalable a otras regiones para monitorear la lluvia.

**Palabras clave:** Ciencia ciudadana, Monitoreo de lluvia, Aplicaciones móviles.

**Resumen gráfico**

**Diagrama

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.**

**Introducción**

En las regiones montañosas, la precipitación presenta una alta variabilidad espacial y temporal, determinada por fenómenos orográficos que dificultan su monitoreo preciso mediante estaciones convencionales (Cruz Miranda, 2021). En México, las redes hidrometeorológicas oficiales, como las operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), tienen una cobertura limitada en áreas de difícil acceso, como los bosques templados de montaña, lo que genera vacíos críticos de información (Rosas et al., 2021). Esta limitación impide una adecuada gestión del agua y dificulta la toma de decisiones para el manejo forestal, la planeación agrícola y la mitigación de riesgos asociados al cambio climático.

El Monte Tláloc, ubicado al oriente del Valle de México, es un sitio de alta relevancia ecológica, histórica y cultural, pero carece de datos climáticos en tiempo real y con resolución local. A pesar de que el ejido que lo habita participa en programas forestales y tiene registradas más de 1600 hectáreas para manejo y conservación (Luna Gil et al., 2023), las decisiones de manejo aún se toman con base en información fragmentaria. Las extracciones forestales y los impactos del cambio climático sobre especies emblemáticas como Abies religiosa demandan herramientas más precisas y accesibles para monitorear las condiciones ambientales (Martínez Gaspar, 2020; Hernández-Álvarez et al., 2021).

A su vez, las aplicaciones disponibles para el registro de datos meteorológicos suelen ser de uso profesional, con interfaces complejas y poca accesibilidad en contextos rurales. Esto genera una brecha entre el potencial de participación ciudadana y las herramientas tecnológicas disponibles, limitando el aprovechamiento del conocimiento local en la generación de información ambiental (Hubp, 1990). Frente a este panorama, se requiere una estrategia de monitoreo participativo que involucre a la comunidad local en la recolección, validación y aprovechamiento de los datos de lluvia.

Este trabajo propone el desarrollo y validación de una aplicación multiplataforma llamada Tláloc App, diseñada para fomentar la ciencia ciudadana mediante el uso de pluviómetros artesanales y tecnologías digitales accesibles. La hipótesis general plantea que la implementación de dicha herramienta incrementará significativamente la frecuencia y precisión de los reportes de lluvia, permitiendo generar información meteorológica complementaria a la de las estaciones profesionales, y mejorando así la caracterización espacial y temporal de la precipitación en el Monte Tláloc.

El objetivo de este estudio fue diseñar, implementar y evaluar una aplicación tecnológica que facilite la participación ciudadana en la recopilación de datos de precipitación, mediante un protocolo de monitoreo participativo y una plataforma digital accesible, con el fin de generar información confiable para apoyar el manejo ambiental y la toma de decisiones en el entorno del Monte Tláloc.

**Materiales y métodos**

**Materiales**

El estudio se desarrolló en el Monte Tláloc, ubicado en el oriente del Valle de México, dentro del municipio de Texcoco, Estado de México. Las actividades se realizaron en once sitios de monitoreo iniciando en julio de 2022.

Para la medición de la precipitación se utilizaron pluviómetros artesanales elaborados a partir de botellas de tereftalato de polietileno (PET) con una capacidad de un litro y resolución de un milímetro. Estas botellas fueron montadas sobre estructuras firmes de madera, cemento y metal, y colocadas a una altura de 1.5 metros sobre el suelo, de acuerdo con las recomendaciones establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2014), con el fin de asegurar lecturas estables, precisas y representativas. Además, cada instrumento fue acompañado por un cartel impreso con instrucciones breves y un código QR único para su identificación y vinculación con la aplicación digital. En cuanto al soporte tecnológico, se emplearon teléfonos inteligentes y tabletas con sistemas operativos Android, iOS y HarmonyOS, lo que permitió realizar pruebas multiplataforma y asegurar compatibilidad con diversos dispositivos.

El desarrollo de la aplicación móvil se realizó mediante el uso del entorno de desarrollo Flutter y el lenguaje de programación Dart. El código fue gestionado con Git y almacenado en un repositorio de GitHub para garantizar control de versiones, trazabilidad y colaboración técnica. Para el almacenamiento y distribución de datos se utilizó Firebase, integrando Firestore como base de datos en tiempo real y Firebase Hosting para desplegar la versión web de la plataforma. La aplicación fue publicada para dispositivos Android a través de Google Play Console mediante archivos compilados en formato .aab, lo cual permitió su distribución controlada entre usuarios participantes.

**Métodos**

La estrategia metodológica se estructuró en tres componentes principales: el diseño participativo del protocolo de monitoreo, el desarrollo técnico de la aplicación Tláloc App y la evaluación del sistema desde una perspectiva tecnológica y científica.

El diseño del protocolo comenzó con la organización de talleres comunitarios en los cinco ejidos que integran la Unión Ejidal del Monte: Nativitas, San Pablo Ixayoc, San Dieguito, Tequexquinahuac y Santa Catarina del Monte. Durante estas sesiones, se trabajó de manera colaborativa con autoridades locales y habitantes para seleccionar los sitios más adecuados para la instalación de los pluviómetros, tomando en cuenta criterios como altitud, pendiente, cobertura vegetal, accesibilidad y exposición directa a la lluvia. Simultáneamente, se aplicaron encuestas para caracterizar aspectos sociodemográficos, tecnológicos, ecológicos y actitudinales de los participantes, lo que permitió adaptar el diseño de la herramienta digital a las condiciones reales de los usuarios finales.

Una vez instalados los instrumentos en campo, se desarrolló una campaña de difusión para fomentar la participación continua. Esta campaña incluyó la elaboración y distribución de materiales impresos como lonas, trípticos y carteles, así como la difusión en redes sociales para alcanzar un público más amplio. Se implementaron también estrategias de reconocimiento e incentivos, como la premiación mensual de los usuarios más activos en el envío de datos, lo que ayudó a mantener el interés y el compromiso comunitario. Cada pluviómetro fue vinculado con un código QR, que permitía a los participantes escanearlo desde la aplicación para identificar el sitio de monitoreo, ingresar la lectura diaria de lluvia y tomar una fotografía como evidencia. Esta información se almacenó automáticamente en la base de datos en línea, junto con la fecha, hora y ubicación del registro.

En términos de procesamiento de datos, se desarrolló un algoritmo interno dentro de la aplicación que permitió calcular automáticamente la precipitación real diaria. Este valor se obtuvo restando la lectura acumulada del día anterior a la del día actual, lo que permitió obtener registros continuos y precisos, reduciendo la posibilidad de errores humanos en el cálculo manual. Además, se incorporó una función de bitácora para que los usuarios pudieran consultar y revisar sus mediciones previas, así como herramientas para visualizar estadísticas y exportar los datos en diferentes formatos.

Para evaluar el **nivel de maduración tecnológica** de la aplicación, se utilizó la metodología propuesta por la norma NMX-GT-004-IMNC-2012, considerando aspectos como la funcionalidad, estabilidad, experiencia del usuario y rendimiento en diferentes plataformas. Las pruebas piloto incluyeron la participación directa de los ejidatarios en condiciones reales, lo que permitió detectar áreas de mejora y validar su viabilidad operativa.

**Resultados y discusión**

5.1. Protocolo de monitoreo participativo

5.1.1. Proceso participativo de ejidatarios

El protocolo de monitoreo participativo se diseñó a partir de un enfoque colaborativo con ejidatarios de los cinco núcleos agrarios que conforman la Unión Ejidal del Monte Tláloc. Durante los talleres realizados en cada comunidad, se identificaron actores clave, se priorizaron parajes de interés ambiental y se delimitaron zonas estratégicas para la instalación de pluviómetros. Esta interacción permitió al equipo técnico adaptar el diseño del protocolo a las condiciones socioculturales locales, fortaleciendo el sentido de pertenencia y apropiación del proyecto. Como resultado, se establecieron 12 sitios de monitoreo en altitudes entre 4 000 y 4 200 m s.n.m., cubriendo una diversidad de microclimas. La participación de los ejidatarios no solo fue clave en la selección de sitios, sino también en la definición de la frecuencia de lectura, la validación de las condiciones de instalación y el seguimiento continuo de los dispositivos.

5.1.2. Diseño técnico de monitoreo

El diseño técnico se enfocó en la construcción e instalación de pluviómetros artesanales elaborados con botellas PET, montados sobre estructuras de madera, cemento y metal, a una altura estandarizada de 1.5 m. Estos instrumentos cumplieron con las recomendaciones básicas de la OMM en cuanto a exposición, estabilidad y visibilidad. Además, se colocaron carteles informativos en campo que incluían instrucciones claras y códigos QR para vincular cada instrumento con la aplicación Tláloc App. La implementación del algoritmo de "medición real" permitió transformar las lecturas acumuladas en registros diarios de precipitación, lo que facilitó el procesamiento y análisis de los datos. La metodología fue validada mediante comparaciones puntuales con pluviómetros profesionales, obteniendo diferencias mínimas dentro de rangos aceptables, lo que confirmó la eficacia del sistema artesanal para fines de monitoreo comunitario.

5.1.3. Campaña de difusión con público en general

La apropiación del sistema por parte de la comunidad fue reforzada mediante una campaña de difusión activa, orientada tanto a los usuarios potenciales como al público general. Se diseñaron materiales gráficos (lonas, carteles y trípticos) con lenguaje accesible, los cuales fueron distribuidos en puntos estratégicos del monte y en los centros comunitarios de los ejidos participantes. Además, se emplearon redes sociales locales y mensajería instantánea para difundir información sobre la instalación de pluviómetros, instrucciones de uso y resultados preliminares. Esta estrategia contribuyó a visibilizar el proyecto, generar confianza y promover la participación ciudadana. Asimismo, se estableció un sistema de incentivos que reconocía mensualmente a los usuarios más activos, lo que incrementó la frecuencia de envío de datos y consolidó una base de usuarios recurrentes.

5.2. Desarrollo del código

5.2.1. Backend

La estructura del backend de Tláloc App se diseñó utilizando la plataforma Firebase, específicamente Firestore para la gestión de la base de datos en tiempo real, y Firebase Hosting para la versión web. Esta elección tecnológica permitió implementar un sistema robusto, escalable y de bajo costo, accesible desde distintos dispositivos y sin requerir infraestructura física adicional. El backend almacena de forma segura cada lectura ingresada, asociando variables como fecha, hora, ubicación, usuario, fotografía y volumen de lluvia. Además, se diseñó un sistema de autenticación con correo electrónico o acceso anónimo para facilitar el uso por parte de usuarios con distintos niveles de familiaridad tecnológica. La información recopilada es accesible para consulta inmediata y puede exportarse para análisis más avanzados.

5.2.2. Frontend

El desarrollo del frontend se realizó en Flutter, permitiendo una interfaz multiplataforma fluida y adaptable. Se priorizó un diseño centrado en el usuario, aplicando principios de usabilidad y accesibilidad. Las principales funciones incluyeron el escaneo del código QR del pluviómetro, el ingreso del dato de lluvia, la toma de fotografía georreferenciada y la visualización de registros anteriores. También se integró una bitácora personal para cada usuario, con estadísticas visuales de su actividad. La experiencia de uso fue validada en campo mediante pruebas piloto, demostrando que los usuarios, incluso con formación técnica limitada, pudieron operar la app con facilidad. El diseño modular del código permite actualizaciones progresivas, y su distribución mediante Google Play facilita su adopción en dispositivos Android.

5.3. Evaluación del nivel de maduración tecnológica

La aplicación Tláloc App alcanzó un Nivel de Maduración Tecnológica TRL 8, lo cual indica que el sistema ha sido probado en condiciones reales de operación con éxito. Esta clasificación fue sustentada por tres años de funcionamiento continuo, en los cuales se registraron más de 350 usuarios activos y una base creciente de mediciones desde distintas localidades. El sistema demostró ser estable, funcional y aceptado por su comunidad objetivo. La integración de los principios de ciencia ciudadana, combinados con una solución tecnológica accesible, permitió generar datos hidrometeorológicos en zonas de difícil acceso, complementando las redes institucionales. La arquitectura técnica facilita su réplica y escalamiento, mientras que el diseño centrado en el usuario garantiza su utilidad práctica en contextos con alta variabilidad en alfabetización digital. En conjunto, estos resultados confirman que Tláloc App es una herramienta madura, eficaz y pertinente para fortalecer redes de monitoreo ambiental participativo en zonas rurales y montañosas.

Gráfico, Gráfico de superficie

Descripción generada automáticamente

**Figura 1.** Respuesta del cultivo de algodón a los diferentes tratamientos de estrés hídrico del suelo. R: rendimiento; HAC1 y HAC2: humedad aprovechable consumida en las etapas de germinación a inicio de floración, y de ésta a madurez fisiológica, respectivamente.

**Cuadro 1.** Cuadrados medios del análisis de varianza del rendimiento y la eficiencia de uso del agua (EUA) en el cultivo de algodón.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Fuente de variación** | **GL** | **Rendimiento (Mg∙ha-1)** | **EUA (kg∙m-3)** |
| Bloques | 3 | 0.1817 | 0.0025 |
| Tratamientos | 6 | 6.1167\*\* | 0.0698\*\* |
| Error | 18 | 0.0893 | 0.0014 |
| Total | 27 |  |  |
| CV |  | 4.29 | 4.86 |

GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación; \*\*: significativo con *P* ≤ 0.01.

**Conclusiones**

El desarrollo e implementación de Tláloc App permitió validar un sistema de monitoreo participativo de lluvia en el Monte Tláloc, basado en herramientas digitales accesibles y la colaboración activa de ejidatarios. El protocolo diseñado, que integró capacitación, instalación de pluviómetros artesanales y una campaña de difusión, facilitó la generación continua de datos confiables en zonas de difícil acceso. La aplicación demostró ser funcional, intuitiva y estable en campo, registrando más de 350 usuarios activos y múltiples contribuciones verificables. El algoritmo incorporado permitió transformar lecturas acumuladas en datos reales diarios con precisión. La evaluación del sistema reveló un nivel de madurez tecnológica equivalente a TRL 8, con capacidad comprobada de adaptación, escalabilidad y utilidad social. Se concluye que la solución propuesta es viable, replicable y efectiva para fortalecer redes de monitoreo ambiental comunitario en contextos rurales, al tiempo que complementa la infraestructura meteorológica institucional con datos de alta resolución espacial y participación ciudadana.

**Agradecimientos**

Hago especial reconocimiento por las enseñanzas, valores y financiamiento que adquirí gracias a la Universidad Autónoma Chapingo; es importante destacar la oportunidad de desarrollar este proyecto al Colegio de Posgraduados.

**Declaración de conflicto de intereses**

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

**Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)**

Durante la preparación de este trabajo, se utilizó DeepSeek con la finalidad de mejorar el estilo y análisis morfosintáctico en la redacción de oraciones. Todo el material obtenido con esta tecnología se revisó y editó, por lo cual los autores asumimos plena responsabilidad por el contenido del artículo publicado.

.

**Referencias**

Se deben presentar todas las referencias bibliográficas citadas a lo largo del manuscrito de acuerdo con las normas APA 7 (http://www.apastyle.org). Asegúrese de que todas las referencias citadas en el texto también estén presentes en la lista de referencias (y viceversa). Todas las referencias deben incluir su DOI (Digital Object Identifier: www.doi.org) o, en su defecto, la dirección electrónica donde sea posible consultar la cita original. En el sitio de la revista se encuentra una guía de referencias APA 7 resumida.

Todas las referencias deben provenir de fuentes primarias; en ningún caso se aceptan referencias de fuentes secundarias (es decir: citado por). No se permiten referencias de tesis, folletos, resúmenes, memorias de congresos, ni cualquier otra publicación de circulación limitada. Tampoco se permiten citas de internet, a menos que sean relativas a estadísticas o anuarios provenientes de instancias oficiales, en cuyo caso se debe registrar la fecha de consulta. Las referencias deben ser de actualidad (últimos 10 años); en la medida de lo posible, estas deben representar 80 % o más del total de las fuentes consultadas.

Si se utiliza algún programa para la gestión de referencias, se deben eliminar los códigos de campo antes de enviar el manuscrito:

1. En su archivo de Word presione *Ctrl* + *e*, para seleccionar todo el contenido.
2. Presione *Ctrl* + *6* o *Cmd* + *6* para desvincular todos los campos y eliminar los enlaces ocultos.

Erkan, M., & Dogan, A. (2020). Harvesting of horticultural commodities. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest technology of perishable horticultural commodities* (pp. 120-159). Elsevier-Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00005-5

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022, July 13). *Countries by commodity. FAOSTAT*. https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\_by\_commodity\_exports

Jha, A., & Kumar, B. (2021). *Nanofibers - synthesis, properties and applications*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.98224

López-Vázquez, D. E., Hernández-Rodríguez, L., Lobato-Calleros, C., & Aguirre-Mandujano, E. (2024). Effect of OSA modification of cacahuacintle corn starch on its physicochemical properties, digestibility and stability. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, *16*(2), 21-38. https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2024.06.020

SAS Institute, Inc. (2018). *User’s guide* (ver. 9) [software]. SAS Institute, Inc. https://www.sas.com/es\_mx/home.html