

DESARROLLO DE UN SOFTWARE ESPECIALIZADO PARA EL ANÁLISIS DEL SERVICIO DE RIEGO EN ZONAS AGRÍCOLAS

Marcos Adrián Murillo Corrales^{1*}; Ernesto Sifuentes Ibarra²; Alan David Ramírez Noriega³; Vladimir Ruíz Pérez¹

¹Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 S/N, C.P. 81110, Juan José Ríos, Sinaloa, México.

avancemarcos@uas.edu.mx - 6871220636 (*Autor de correspondencia)

²INIFAP. Campo Experimental Valle del Fuerte. Carretera Internacional México-Nogales, Km. 1609, C.P. 81110, Juan José Ríos, Sinaloa, México.

³Facultad de Ingeniería Mochis. Universidad Autónoma de Sinaloa, Ciudad Universitaria, Fuente de Poseidón y Prolongación Ángel Flores, S/N, Los Mochis, Sinaloa, México.

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de un software especializado para el análisis del servicio de riego en zonas agrícolas, con el objetivo de identificar y gestionar el estrés hídrico en cultivos dentro del módulo de riego Batequis. El software integra datos climáticos, registros de riego y fechas de siembra, empleando Python y librerías como Pandas y Tkinter. Mediante la metodología ágil Scrum, se lograron iteraciones rápidas que permitieron ajustar el sistema a las necesidades específicas del módulo de riego, mejorando la toma de decisiones y optimizando la distribución del agua. Los resultados demuestran que el software es efectivo para identificar el estrés hídrico y ofrece ventajas significativas en comparación con herramientas existentes, contribuyendo a la eficiencia y sostenibilidad en el uso del agua en la agricultura.

Palabras claves: Estrés hídrico, riego agrícola, software especializado.

Introducción

El cambio climático tiene impactos relevantes, entre los que destacan el aumento de las temperaturas globales y la disminución de las precipitaciones. Estos aspectos no sólo agudizan la escasez de agua, sino que también reducen la capacidad de producir alimentos; un desafío que empeora con el aumento de la población y la demanda tanto de agua como de alimentos. En este contexto, la gestión eficiente del agua se ha vuelto crucial para asegurar la producción agrícola, especialmente en México, donde los sistemas de riego enfrentan desafíos estructurales y operativos que los alejan de la eficiencia y la sustentabilidad. Muchos de estos sistemas se remontan a tecnologías que no han sido renovadas, tal es el caso del riego por gravedad, que es el método más utilizado en el país, cubriendo la mayor parte de la superficie de riego. Sin embargo, su eficiencia de aplicación es inferior al 50%, lo que significa una baja productividad del agua y una disminución de la producción agrícola (Chávez et al., 2022). Esta situación se ve agravada por la ausencia de innovación tecnológica, la falta de disponibilidad para capacitar a los agricultores y el poco apoyo del gobierno para actualizar estos sistemas a nuevas tecnologías.

A nivel nacional se tienen registradas 6,032,822 hectáreas de riego, principalmente operadas por distritos de riego y asociaciones de usuarios. Un ejemplo destacado es el Distrito de Riego 075 en Sinaloa, que abarca 302,000 hectáreas y es uno de los principales productores de maíz, con un rendimiento promedio de 12.83 t ha^{-1} y una producción total de 1,775,410.43 toneladas en 2023 (SIAP, 2023). En un intento por eficientizar el uso del agua en este distrito y específicamente en su Módulo de Riego Batequis, utilizan una aplicación tecnológica para el pronóstico del riego en tiempo real (SPRITER); desarrollada en 1994 por el IMTA e implementada en varios distritos de México, en el Módulo Batequis demuestra su utilidad al optimizar la calendarización y control de riegos; pronostica la demanda de agua de los cultivos y apoya en la toma de decisiones sobre la cantidad y momento de riego (Ojeda et al., 2003). Sin embargo, a pesar de los avances que ofrece, SPRITER genera grandes cantidades de datos que no siempre son aprovechadas por los usuarios del sistema en la operación diaria del riego.

Ante esta situación, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar una aplicación tecnológica para determinar estrés hídrico de los cultivos de un Módulo de Riego mediante el uso de datos climáticos y originados por SPRITER que permita analizar la programación de riegos durante un ciclo agrícola, lo que contribuye a mejorar la gestión y, por lo tanto, aumentar la productividad agrícola y garantizar una mayor sostenibilidad en el uso del agua.

Materiales y métodos

Área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en el módulo de riego Batequis II-3, que forma parte del DR-075. La zona presenta un clima seco estepario con una precipitación media anual de 350 mm. Los suelos de la región son en su mayoría arcillosos, con una humedad aprovechable que varía entre 0.15 y 0.16 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y pendiente plana. El ciclo agrícola principal de esta área es el otoño-invierno, e incluye tanto cultivos de fechas tempranas como segundos cultivos. Actualmente presenta desafíos en la gestión eficiente del agua, especialmente en cultivos de maíz que tienen una alta demanda hídrica.

Metodología de desarrollo de software.

Para el desarrollo de software se realizó la metodología Ágil Scrum (Schwaber, 2020), que permitió iteraciones rápidas y adaptativas según las necesidades específicas del módulo de riego Batequis. Las fases del desarrollo incluyeron:

1. Planificación de iteraciones: se definieron sprints de dos semanas para desarrollar funcionalidades específicas de software, como la gestión de datos climáticos, la interfaz gráfica y los cálculos de estrés hídrico.
2. Revisión y retroalimentación: Al final de cada sprint, se realizó una revisión con expertos en riego para ajustar las funcionalidades y la interfaz del software.
3. Herramientas utilizadas: se implementaron herramientas como Trello para la gestión de tareas y GitHub para el control de versiones.

Arquitectura del software.

El software fue diseñado con una arquitectura basada en capas para asegurar modularidad, escalabilidad y un fácil mantenimiento. La arquitectura presentada en la Figura 1, consta de las siguientes capas:

1. Capa de presentación: Desarrollada utilizando Tkinter, proporciona una interfaz gráfica que permite a los usuarios seleccionar el ciclo agrícola, la fecha para el análisis y generar el informe detallado sobre el estrés hídrico de los lotes correspondientes a la selección.
2. Capa lógica de negocios: implementada en Python, esta capa se encarga de los cálculos de evapotranspiración real (ET_r), la determinación del nivel de estrés hídrico utilizando la metodología de Grados Día Desarrollo (GDD) el cual también fue calculada por el sistema basada en los datos climáticos.
3. Capa de acceso a datos: Gestiona la conexión con la base de datos MySQL que almacena datos climáticos, registros de riego y fechas de siembra de cada parcela del módulo de riego Batequis.

La Figura 1 presenta la arquitectura completa del software, mostrando cómo interactúan entre sí las diferentes capas para procesar los datos y generar los informes de estrés hídrico.

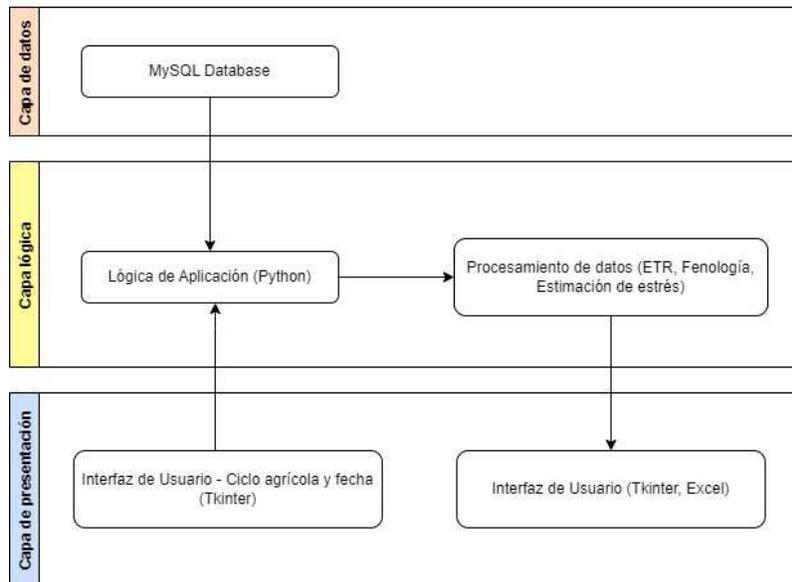


Figura 1. Arquitectura del software basada en capas.

Base de datos y fuentes de información.

La base de datos utilizada para el desarrollo del software integró información del módulo de riego Batequis provenientes del sistema SPRITER correspondiente al ciclo agrícola otoño-invierno 2018-2019, con registros de 1542 lotes de los cuales se seleccionaron 855 dedicados al cultivo de maíz. Los datos incluidos fueron:

1. Datos de riego.
2. Datos generales de siembra.
3. Datos de texturas de lotes.

Para aquellos cálculos que requirieron datos climáticos históricos se contó con información correspondiente proporcionada por INIFAP. La información antes mencionada se integró a una base de datos MySQL, la cual fue preprocesada para asegurar calidad y consistencia de los datos, eliminando registros duplicados y corrigiendo valores atípicos antes de su incorporación al software.

Proceso de cálculo y análisis.

El software sigue un flujo de trabajo que le permite calcular ETr, determinar fechas fenológicas de los cultivos basada en GDD y determinar el estrés hídrico en los cultivos tal como se ilustra en la Figura 2.

1. Entrada de datos climáticos y de riego: El usuario selecciona el ciclo agrícola y la fecha de análisis o fecha de corte.
2. Cálculo de ETr: Se utiliza la fórmula $ETr = ET_0 \times K_c$, donde ET_0 representa la evapotranspiración de referencia obtenida de datos climáticos, y K_c es el coeficiente del cultivo calculado según la etapa fenológica determinada por GDD.
3. Determinación del estrés hídrico (WS): La fórmula $WS = (ETr_{acum} / HFA) \times 100$ se aplica para calcular el nivel de estrés hídrico, donde WS es el estrés hídrico, ETr_{acum} es la evapotranspiración real acumulada expresada en milímetros de cada día desde la

fecha del último riego aplicado al cultivo hasta la fecha de análisis, y HFA es la humedad fácilmente aprovechable del suelo también expresada en milímetros.

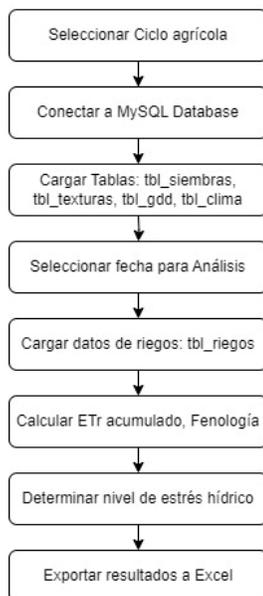


Figura 2. Flujo de trabajo de la aplicación

Los criterios que se tomaron para determinar el nivel de estrés hídrico en el caso de los cultivos de maíz se muestran en el Cuadro 1.

Nivel de estrés	Rango del valor WS
Sin estrés	≤ 30
Bajo estrés	>30 y ≤ 60
Medio	>60 y ≤ 100
Alto	>100

Cuadro 1. Valores utilizados para clasificar estrés hídrico, modificado de Sifuentes et al. (2021).

Interfaz gráfica del usuario.

La interfaz gráfica del software fue desarrollada con Tkinter y permite a los usuarios interactuar de manera intuitiva. La Figura 3 muestra un ejemplo de la interfaz, que incluye un menú desplegable para seleccionar el ciclo agrícola y un calendario para elegir la fecha de análisis o de corte. Un botón de “Iniciar análisis” activa el proceso, generando un informe detallado del estrés hídrico.

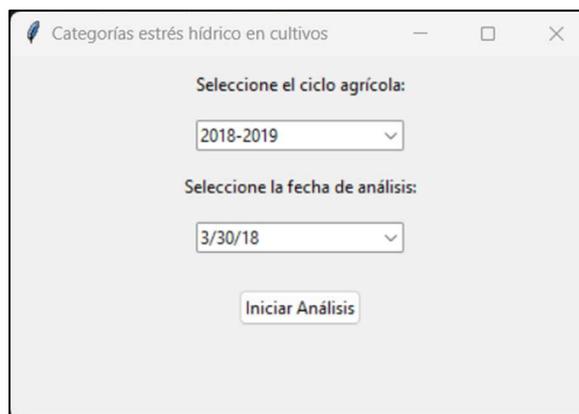


Figura 3. Interfaz gráfica de la aplicación propuesta

Pruebas de validación.

Para asegurar la funcionalidad y precisión del software, se llevaron a cabo pruebas que incluyeron tanto pruebas de funcionamiento completo como pruebas manuales de cálculo.

Pruebas de funcionamiento completo. Se realizaron pruebas de funcionamiento completo para validar que el software operara correctamente. Estas pruebas se enfocaron en evaluar cómo el sistema procesaba los datos de entrada (datos climáticos, registros de riego y fechas de siembra), realizaba los cálculos de evapotranspiración real (ET_r), estimación de la fenología, estrés hídrico (WS), y generaba los informes en formato Excel de manera precisa y sin errores. Durante estas pruebas, se utilizaron tanto datos simulados como datos reales del módulo de riego Batequis para asegurar que el software pudiera manejar la diversidad y complejidad de la información climática y de riego. Los aspectos verificados fueron:

1. Entrada de datos: El software fue capaz de cargar y procesar los datos climáticos y de riego correctamente.
2. Cálculos: Se comprobó que los cálculos de ET_r y WS se realizaban de acuerdo con las fórmulas establecidas y que los resultados eran consistentes con las expectativas.
3. Generación de informe: Se verificó que el software generara el informe de estrés hídrico en formato Excel, con información precisa y estructurada.

Estas pruebas confirmaron que el software funcionaba correctamente en su totalidad y era capaz de realizar el análisis del estrés hídrico de forma confiable.

Pruebas manuales de cálculo. Además de las pruebas de funcionamiento completo, se llevaron a cabo pruebas manuales de cálculo para garantizar la precisión del software. Estas pruebas implicaron la selección de un conjunto de lotes representativos, en los cuales se realizaron los cálculos de ET_r y WS de manera manual para luego compararlos con los resultados generados por el software.

Formato del reporte final.

El reporte final generado por el software proporciona un análisis detallado del nivel de estrés hídrico de cada lote. La Figura 4 muestra el formato en Excel del informe que se genera al

finalizar el proceso de análisis, permitiendo a los operadores del módulo tomar decisiones informadas sobre la distribución de agua en sus cultivos.

El reporte final después del procesamiento de datos ofrece información relevante de cada lote para la toma de decisiones entre las que destacan:

1. Identificador del lote
2. Fecha de siembra
3. Fecha de último riego
4. Número de riego más reciente
5. Número de días desde el último riego
6. Etapa fenológica del cultivo hasta la fecha de análisis
7. Categoría de estrés hídrico

ID_USU	ID_USU_BCTA	CICLO	FAC_CON	FECHA_SIEMB	FECHA_ULTIMO_RIEGO	N_RIEGO_MAS_RECIENTE	WFA_ULTIMO_RIEGO	DIAS_DESDE_ULTIMO_RIEGO	DIAS_DESDE_SIEMBRA	ETR_ACUM	Etapas_Fenologicas	Categoria_Estrés	Porcentaje_Estrés	Tipo_Suelo
006817	02	2018-2019	006817	2018-11-20	2019-03-21	4	N/A	10	131	59.95	R3	No se puede calcular	0.00	Arcilla
006891	02	2018-2019	006891	2018-12-21	2019-03-11	3	89.6	20	100	308.654	R1	Alto	121.27	Arcilla
007459	02	2018-2019	019465	2019-02-15	2019-02-15	1	76.8	44	44	51.295	V5	Medio	66.79	Arcilla
007559	02	2018-2019	018750	2018-11-24	2019-01-09	2	64	81	127	295.74844	R3	Alto	462.11	Arcilla
007567	02	2018-2019	756900	2019-03-01	2019-03-01	1	76.8	30	30	28.225	V4	Bajo	36.75	Arcilla
007731	02	2018-2019	007731	2018-12-22	2019-03-21	3	89.6	10	99	67.92	R1	Medio	75.80	Arcilla
007837	02	2018-2019	019497	2019-11-08	2019-03-07	3	89.6	24	143	102.65	R4	Alto	115.68	Arcilla
008050	02	2018-2019	019356	2018-11-22	2019-03-18	4	N/A	13	129	77.645	R3	N/A	0.00	Arcilla
008050	05	2018-2019	019071	2018-12-20	2019-03-04	4	N/A	27	101	133.788	R1	N/A	0.00	Arcilla
008180	02	2018-2019	019344	2019-02-15	2019-02-15	1	76.8	44	44	51.295	V5	Medio	66.79	Arcilla
008232	02	2018-2019	018751	2019-12-05	2019-03-26	4	N/A	5	116	34.96	R2	N/A	0.00	Arcilla
008328	05	2018-2019	008328	2018-11-08	2019-03-12	3	89.6	19	143	87.9	R4	Medio	98.10	Arcilla
008332	02	2018-2019	019441	2019-02-15	2019-02-15	1	76.8	44	44	51.295	V5	Medio	66.79	Arcilla
008364	00	2018-2019	019575	2018-12-30	2019-03-25	4	N/A	6	91	42.96	R1	N/A	0.00	Arcilla
008365	00	2018-2019	019208	2018-12-27	2019-03-23	3	89.6	6	94	54.952	R1	Medio	61.33	Arcilla
008365	00	2018-2019	019309	2019-12-27	2019-03-26	3	89.6	6	94	42.96	R1	Bajo	47.95	Arcilla
008369	00	2018-2019	019688	2018-11-15	2019-03-19	5	N/A	12	136	66.96	R4	N/A	0.00	Arcilla
008370	00	2018-2019	837000	2019-02-14	2019-02-14	1	76.8	45	45	51.96	V5	Medio	67.66	Arcilla
008371	00	2018-2019	019864	2019-03-01	2019-03-01	1	76.8	30	30	28.225	V4	Bajo	36.75	Arcilla
008372	00	2018-2019	019372	2018-11-15	2019-03-04	4	N/A	27	136	130.38	R4	N/A	0.00	Arcilla
008374	00	2018-2019	019549	2019-02-11	2019-02-11	1	76.8	48	48	56.495	V6	Medio	73.56	Arcilla
008377	01	2018-2019	019649	2018-12-29	2019-03-05	2	64	26	92	120.255	R1	Alto	187.90	Arcilla
008377	01	2018-2019	737700	2019-01-01	2019-03-01	1	76.8	30	89	125.82734	R1	Alto	163.84	Arcilla
008377	02	2018-2019	019443	2019-03-01	2019-03-05	2	64	26	89	112.25876	R1	Alto	181.78	Arcilla
008379	00	2018-2019	018915	2018-12-26	2019-03-29	3	89.6	2	95	17.88	R1	Sin Estrés	19.96	Arcilla
008379	00	2018-2019	019395	2019-01-11	2019-03-25	3	89.6	6	79	37.948	V7	Bajo	42.35	Arcilla
008382	00	2018-2019	018916	2018-12-16	2019-02-24	2	64	35	105	166.5385	R2	Alto	260.22	Arcilla

Corte al 31 Mar 2019 1/62

Figura 4. Formato del reporte final después del proceso para estimar estrés hídrico en cultivos.

Resultados y discusión

Las pruebas manuales de cálculo confirmaron la exactitud del software en la estimación de ETr, fenología y WS; como ejemplo se muestra en el Cuadro 2 los cálculos manuales y los generados por el software al calcular ETr tomando como referencia unos registros de lotes para comparar. Este resultado demuestra la precisión del sistema y valida su utilidad como herramienta para el análisis de estrés hídrico en cultivos de maíz.

Lote	ETr Manual (mm)	ETr Software (mm)	Diferencia (%)
Lote 8328	87.90	87.9	0
Lote 8365	42.96	42.96	0

Cuadro 2. Ejemplo de resultados de las pruebas manuales

El sistema permitió identificar una evolución del estrés hídrico en los cultivos durante un periodo de tiempo, con esto se demuestra que es posible monitorear y detectar cambios en las condiciones de los lotes.

A continuación, se describen los resultados de dos ejercicios para dos fechas distintas del ciclo 2018-2019 en cultivos de maíz. En la Figura 5 se muestra que, al 31 de diciembre de 2018, la mayoría de los lotes (554) no presentaban estrés hídrico, mientras que un menor número se encontraba en bajo (212), medio (65), y alto estrés (24). Esto indica que, en esta etapa del ciclo agrícola, el riego fue adecuado para la mayoría de los lotes.

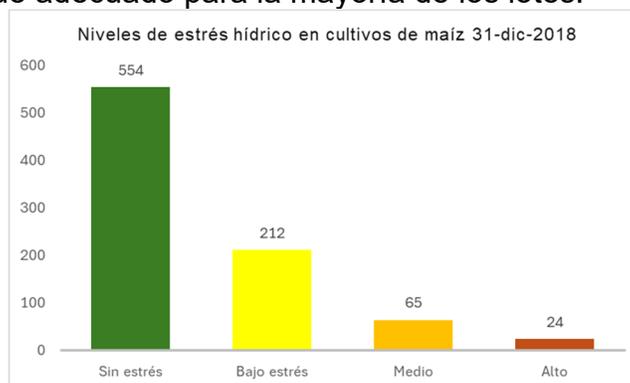


Figura 5. Ejemplo de clasificación de estrés hídrico con fecha de corte al 31 de diciembre del 2018.

Sin embargo, al 31 de enero del 2019 como lo muestra la Figura 6, se observa un cambio significativo, donde la cantidad de lotes sin estrés disminuyó a 242, mientras que los lotes con estrés aumentaron a 297 y los de alto estrés a 107. Este cambio sugiere que las condiciones de riego se volvieron demandantes, haciendo que más lotes requirieran ajustes en su programación de riego.

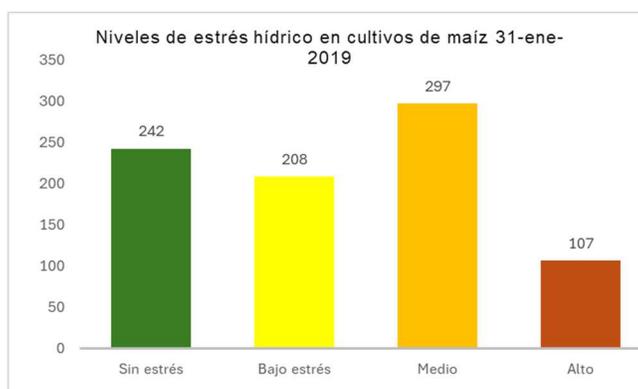


Figura 6. Ejemplo de clasificación de estrés hídrico con fecha de corte al 31 de enero del 2019.

El aumento en los niveles de estrés medio y alto entre diciembre y enero demuestra la importancia de un monitoreo constante del estado hídrico de los cultivos. Las gráficas muestran los niveles de estrés y su evolución de este a lo largo del ciclo agrícola, la cual se utiliza para la planificación y la optimización del uso del agua, contribuyendo a la sostenibilidad de la producción agrícola.

Conclusiones

El software desarrollado demostró su capacidad para identificar el estrés hídrico en los cultivos de maíz durante el ciclo agrícola otoño invierno 2018-2019. El software logró identificar correctamente los niveles de estrés hídrico en los cultivos de maíz, utilizando los criterios establecidos. La clasificación de los diferentes niveles de estrés permitió la identificación de áreas que requerían ajustes en la programación de riego, que permitirá la optimización del agua disponible. Las pruebas de funcionamiento completo demostraron que el software es capaz de procesar la diversidad de los datos climáticos, de riego y datos generales de los lotes, mediante cálculos y generación de un reporte práctico para el usuario. Esta propuesta tecnológica se comporta como un complemento a la herramienta SPRITER, ya que, con los datos concentrados en este último, se pudo generar información valiosa para los responsables de la programación de riegos. Se recomienda aprovechar la extensa base de datos generada por SPRITER, ya que a menudo estos datos han sido subutilizados; existe un gran potencial para seguir desarrollando aplicaciones adicionales que complementen y amplíen el análisis del servicio que se ofrece en los módulos de riego. Al implementar una estrategia de proyectos modulares, se podrían crear sistemas especializados que aborden otros aspectos del riego y manejo de cultivos, permitiendo la integración de la información de SPRITER de manera más eficiente.

Referencias bibliográficas

- Chávez, C., Fuentes, S., Fuentes, C., Brambila-Paz, F., & Trejo-Alonso, J. (2022). How Surface Irrigation Contributes to Climate Change Resilience—A Case Study of Practices in Mexico. *Sustainability*, 14(13), 7689. <https://doi.org/10.3390/su14137689>
- Ojeda, W., Sifuentes Ibarra, E., & de León Mojarro, B. (2003). *Sistema de pronóstico del riego en tiempo real*.
- Schwaber, K. & S. J. (2020). *The Scrum Guide*. <https://Scrumguides.Org/Scrum-Guide.Html>.
- SIAP. (2023). *Reporte de producción agrícola*.
- Sifuentes, E., Ojeda Bustamante, W., Macías Cervantes, J., Mendoza Pérez, C., & Preciado Rangel, P. (2021). Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. *Agrociencia*, 55(3), 209–226. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2414>