



Agricultura de precisión y riego inteligente

Evidencia de campo y experiencias de Zacatecas

Dr. Miguel Servín Palestina

INIFAP · Campo Experimental Zacatecas

Foro Innovación Rural · Auditorio de la Unidad Académica de Economía

Zacatecas, 28 de octubre de 2026



2026
año de
Margarita
Maza

1. Contexto: Calera, Zacatecas

Centro-norte de México, en el corazón de Zacatecas



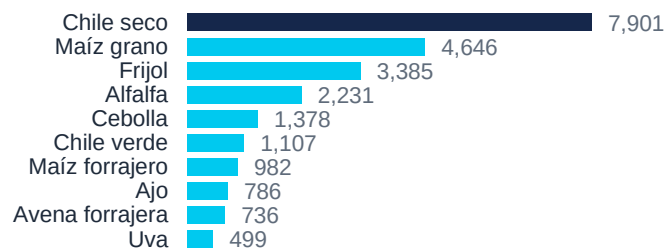
2,226 km²
≈3 % del estado



≈349 mil hab.
91 % en zona urbana

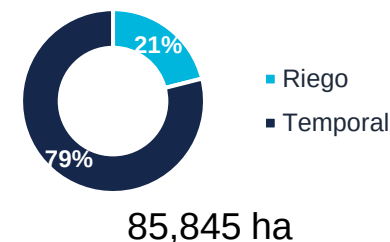


¿Qué se siembra? superficie sembrada (ha)



Superficie agrícola

2001–2008



90 %

del agua extraída va a la agricultura

18,074 ha

de riego con agua del acuífero

80 %

del valor de la producción

LOS RETOS DEL ACUÍFERO



Sobreexplotación

Niveles 2–30 m más abajo (1997–2015); conos de 1.2–1.8 m/año en zonas agrícolas.

Balance (hm³/año)



Riego poco eficiente

Eficiencia global de 43.5 % y 70 % tecnificado; cultivos con baja productividad del agua.



Calidad del agua

Arsénico sobre la norma en algunas zonas; sodio, sales y nitratos altos en el norte.

Calera necesita reducir la presión sobre el agua subterránea

Parcela -> Unidad de producción de riego -> Zona de riego -> Acuífero

“La parcela el núcleo principal para la seguridad hídrica”



2. Conceptos Básicos

Agricultura de precisión (AP)

Manejar la variabilidad espacial y temporal del cultivo con datos.

Riego de precisión

Aplicar la lámina correcta, en el momento y el lugar correctos; puede variar dentro de la parcela.

Riego inteligente

Medición + modelo + decisión automatizada, con retroalimentación del cultivo.

Métricas: reportar siempre con unidades



Agua aplicada

mm o m³/ha. Volumen entregado a la parcela; distinguirlo de la extracción del pozo.



Consumo (ETc)

mm. Evaporación + transpiración. $K_c \times ETo$ en condiciones estándar del cultivo.



Productividad del agua (PA)

kg/m³. Rendimiento ÷ volumen. Aclarar agua aplicada o consumida.

¿Que es el riego inteligente?



Retroalimentación: ajustar Kc, umbrales y modelos con datos del propio predio

Cuándo: cuando el agotamiento llega a la fracción permisible o la tensión al límite calibrado

Cuánto: reponer el déficit de raíces, ajustado por lluvia y eficiencia de aplicación.

Con qué: $ET_c = K_c \times ET_o$ de la estación; sensores para verificar

3. Importancia de los datos para la toma de decisiones

Mediciones integrales



Suelo

Mide: tensión (kPa) o contenido volumétrico (m^3/m^3)

Sirve: decidir cuándo regar

Límite: capacitancia con errores $>0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Evelt et al., 2012)



Planta

Mide: temperatura del dosel $\rightarrow$ índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

Sirve: ver la respuesta del cultivo

Límite: depende de radiación, viento y DPV (Jackson et al., 1981)



Clima

Mide: radiación, temperatura, humedad, viento, lluvia

Sirve: calcular ETo, es decir, cuánto regar (FAO-56)

Límite: mantenimiento y representatividad del sitio

Nota Importante: Calibración y Automatización

Calibración de sensores de humedad



Analizador de humedad

10–15 min

por determinación, según el protocolo INIFAP

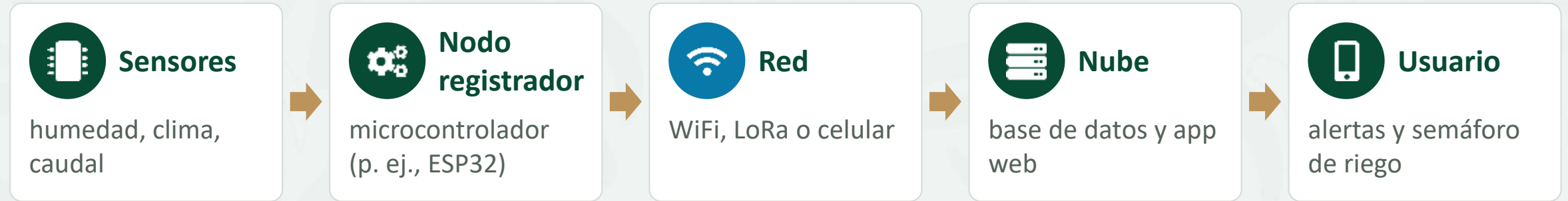
Resultado en base seca

$$H = 100 \times (\text{masa húmeda} - \text{masa seca}) / \text{masa seca}$$

Para convertir humedad en lámina

Integrar densidad aparente, profundidad de raíces y límites de humedad de cada suelo.

Automatización para la toma de datos



Ejemplo en Zacatecas

Calibración de sensores de humedad. Celda de carga + ESP32 registran peso y lectura.

Sistema de monitoreo de humedad a nivel parcelario

Lo que limita su uso en campo

- Cobertura de red y energía en la parcela
- Equipos con fallas y falta de personal capacitado (Evans et al., 2013)
- Datos sin formato común entre marcas

Modelos de crecimiento y desarrollo de cultivos

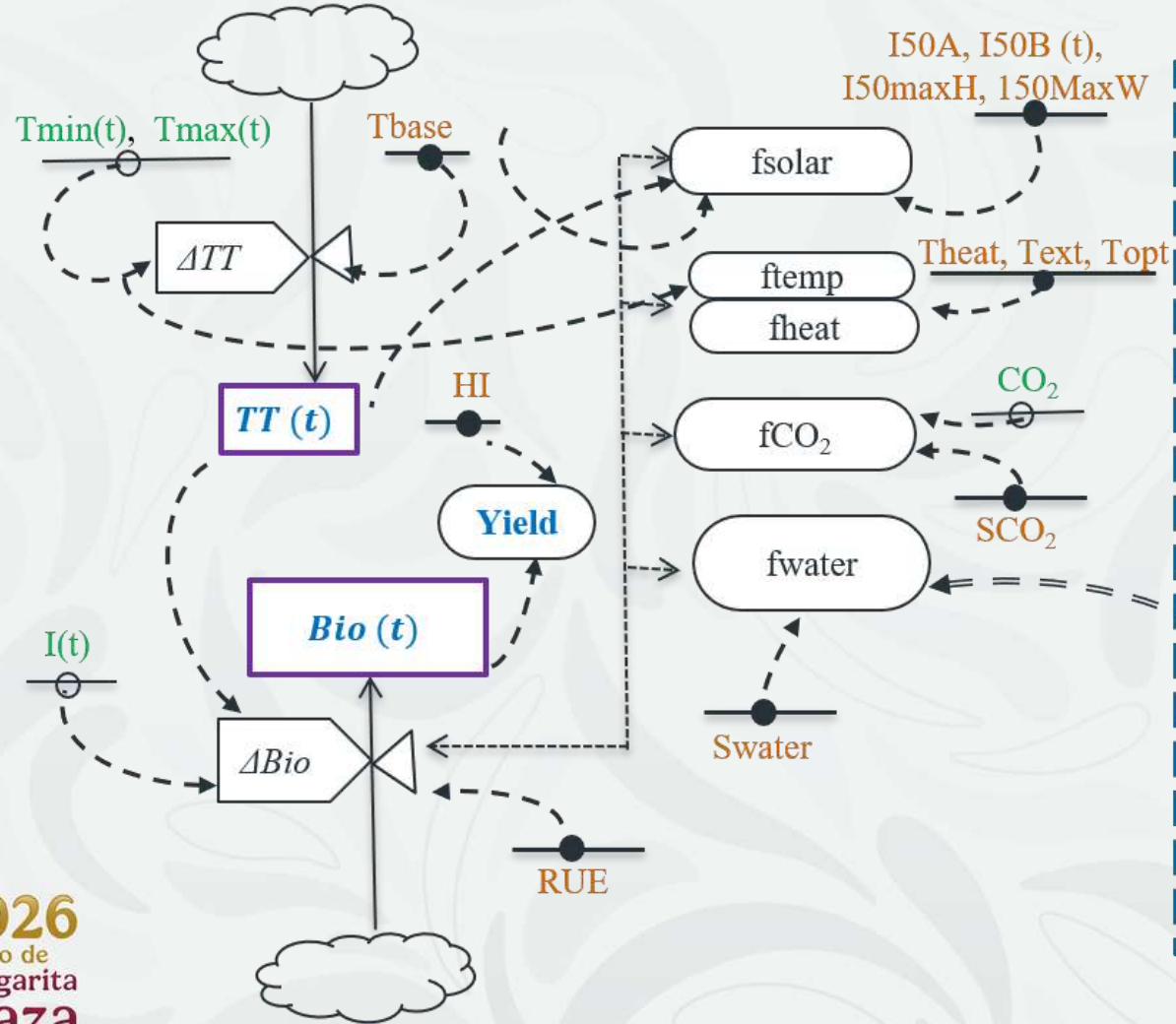
donde:



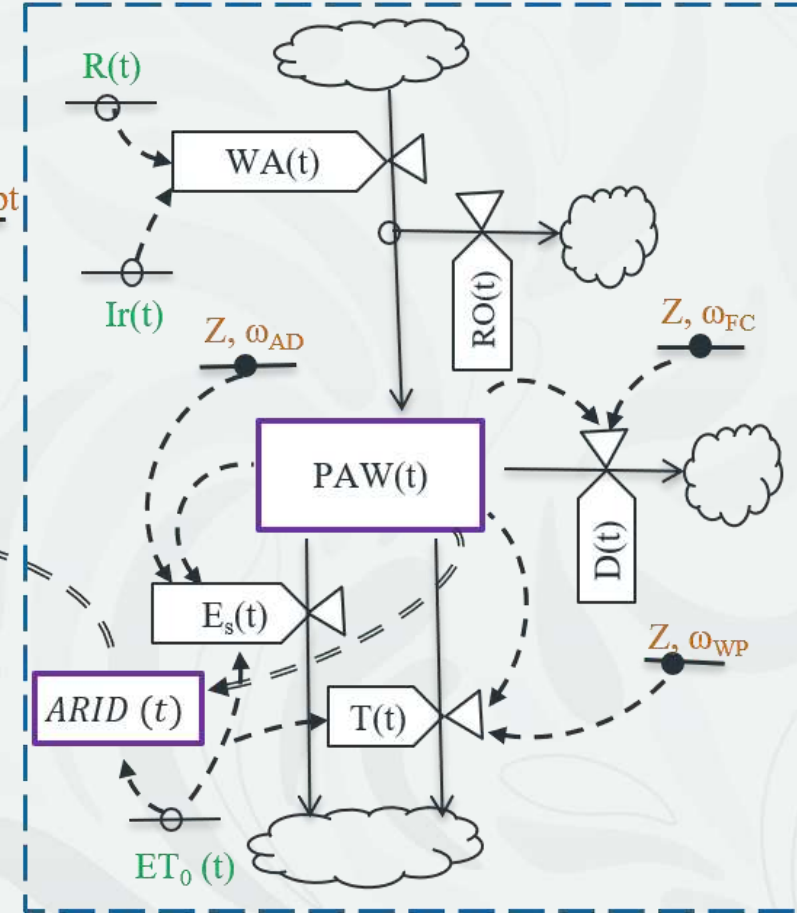
Variables de estado
Tasas de cambio

Variables de entrada
Parámetros

Flujos de material
Flujos de información



ARID Sub - model



2026
año de
Margarita
Maza

Los modelos locales apoyan la planeación y requieren evaluación

Trabajo en Zacatecas	Resultado reportado	Alcance
SIMPLE, frijol Pinto Saltillo	Evaluación 2021: RMSE <1.80 t/ha; EF >0.89 en biomasa	Campo + simulación; 2020 para calibrar
SIMPLE + índice de cosecha	Error medio de rendimiento: 6.9 %	Modelo empírico; ampliar evaluación
Red neuronal para ETo	Evaluación: RMSE 0.48 mm/día; EF 0.92	Referencia ETo Penman–Monteith; no publicado
ARID, balance diario	Integra lluvia, riego y ETo	Diagnóstico de déficit; no prueba ahorro

Predecir bien una variable es un paso previo a demostrar mejores decisiones de riego.



Servín-Palestina et al. (2022, 2024); ANN ETo y ARID model Ajo, materiales del autor. EF: eficiencia de Nash–Sutcliffe; RMSE: raíz del error cuadrático medio.

En ajo, los casos locales reportan 29–34 % menos agua aplicada

Indicador	Las Arcinas · Trancoso	Santa Lucía · Fresnillo
Manejo documentado	Watermark calibrado: 15–35 cbar	SUPAR + termobalanza + acompañamiento
Lámina por ciclo	1,200 a 850 mm (–29.2 %)	1,300 a 860 mm (–33.8 %)
Volumen por hectárea	3,500 m ³ /ha menos	4,400 m ³ /ha menos
Rendimiento	21.2 a 24.7 t/ha (+16.5 %)	24.0 a 29.6 t/ha (+23.3 %)
PA sobre agua aplicada	1.77 a 2.91 kg/m ³ (+64.5 %)	1.85 a 3.44 kg/m ³ (+86.4 %)

SUPAR ajusta la superficie a la oferta de agua del pozo

Indicador	Ciclo sin planeación	Maíz PV 2026
Superficie sembrada	42 ha	26 ha
Bombeo reportado	24 h/día	18 h/día; caudal 29 L/s
Rendimiento por hectárea	14.0 t/ha	16.5 t/ha (+17.9 %)
Producción del área comparada*	588 t	429 t (−27.0 %)
Lámina y PA	No reportadas	687 mm; 2.40 kg/m ³

La mejora por hectárea acompaña una reducción de superficie y de producción total.

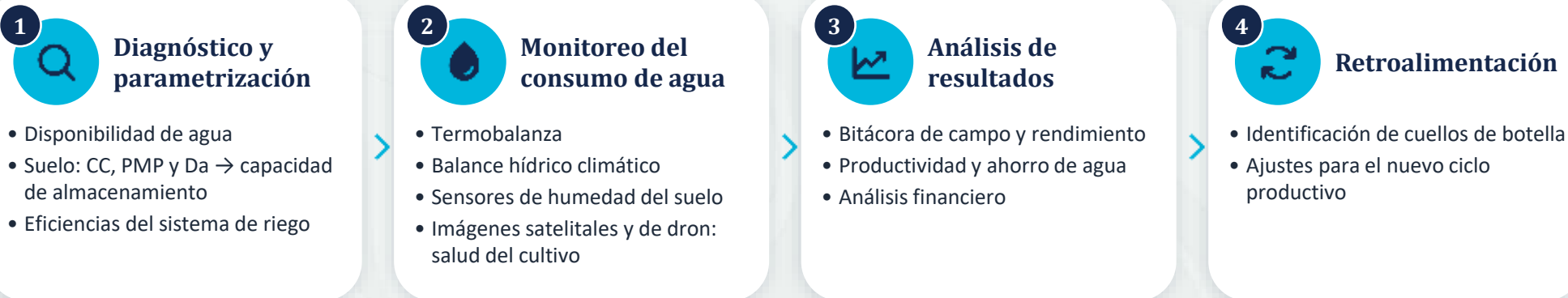


Ficha SUPAR INIFAP 2026. *Producción calculada = superficie × rendimiento. Comparación entre ciclos; faltan volumen total previo y análisis de margen económico.

Caso de éxito: Proyecto Aguas Firmes

EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA CON ENFOQUE SISTÉMICO

Vemos la unidad de producción como un sistema: **pequeños cambios coordinados**, la **investigación participativa** y los **datos** permiten decisiones ajustadas, adoptables y de bajo riesgo.



 **Mejora continua:** se reinicia el diagnóstico con los ajustes identificados

LO QUE HEMOS LOGRADO

Cultivo	Ahorro (m³/ha)	Productividad (kg/m³)		Huella hídrica (m³/t)	
		con AF	sin AF	con AF	sin AF
Chile seco	1,470	1.81	0.71	551	1,411
Maíz grano	800	4.86	3.18	206	314
Ajo	4,400	4.17	2.10	240	477
Frijol	150	1.33	0.83	750	1,200

4.97 hm³

de agua ahorrados

2,132 ha en 2026
1,715 ha en 2025



2026
año de
Margarita Maza

Conclusiones

1 Medir antes de decidir

$R^2 = 0.99$

termobalanza frente a estufa

Calibrar sensores y combinar suelo, planta y clima para decidir cuándo y cuánto regar.

2 Planear con el agua del pozo

+17.9 %

rendimiento de maíz con SUPAR

Ajustar la superficie a la capacidad del pozo para cubrir la demanda pico del cultivo.

3 Aplicar menos, producir más

29–34 %

menos lámina aplicada en ajo

Con 16–23 % más rendimiento en los casos documentados de Trancoso y Fresnillo.

4 Llevar el ahorro al acuífero

≈67 hm³/año

concesión sobre lo sustentable

Validar varios ciclos, medir la extracción por pozo y acordar el uso del volumen liberado.

La parcela es el núcleo de la seguridad hídrica: medir, planear y verificar



Gracias

Dr. Miguel Servín Palestina

INIFAP · Campo Experimental Zacatecas

servin.miguel@inifap.gob.mx



2026
año de
Margarita
Maza