



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

COORDINACIÓN DE DESARROLLO PROFESIONAL E INSTITUCIONAL

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

TESIS

MODELO DE GESTIÓN DEL SERVICIO DE RIEGO PARA GRANDES ZONAS AGRÍCOLAS, APOYADO CON PERCEPCIÓN REMOTA E INFORMACIÓN CLIMÁTICA

que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias y Tecnología del Agua

presenta

Ernesto Sifuentes Ibarra

Tutor: Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Jiutepec, Morelos, México.

2020

Paseo Cuaunháhuac No. 8532, Col. Progreso, CP. 62550, Jiutepec, Morelos.
Tel: (777) 329 3600 www.gob.mx/imta



2020
LEONORA VICARIO
REMEMERATA MADRE DE LA PATRIA

F.C5.02.44.1



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada: **“Modelo de gestión del servicio de riego para grandes zonas agrícolas, apoyado con percepción remota e información climática”**, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Ernesto Sifuentes Ibarra

Jiutepec, Morelos, México, Noviembre del 2020



Tesis elaborada bajo la supervisión del comité tutorial particular de asesoría para obtener
El grado de

DOCTOR EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

COMITÉ PARTICULAR

TUTOR: DR. WALDO OJEDA BUSTAMANTE

ASESOR: DR. RONALD E. ONTIVEROS CAPURATA

ASESOR: DR. RENÉ LOBATO SÁNCHEZ

ASESOR: DR. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN

ASESOR: DR. MAURO ÍÑIGUEZ COVARRUBIAS

Jiutepec, Morelos, México.

2020

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mis padres y a mis hermanos.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por darme la oportunidad de llevar a cabo el presente proyecto de desarrollo profesional y personal.

Al Comité Tutoral por su atinada dirección y su tiempo para el desarrollo de este trabajo, en especial al Dr. Waldo Ojeda Bustamante.

Al personal investigador y de campo del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP y a los estudiantes de la Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte (FAVF) de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) y de la Universidad de Los Mochis (ULM), que brindaron su apoyo en la medición de variables de campo.

Al personal técnico y administrativo de los módulos de riego Batequis II-3, Ruíz Cortines II-2 y Santa Rosa III-3, pertenecientes al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, así como al módulo 3 del Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, por compartir su experiencia, facilitar la realización de trabajos de campo y proporcionar información agrícola e hidrométrica para el diagnóstico y análisis de la gestión del servicio de riego.

A todas las personas y organismos agrícolas, que directa o indirectamente brindaron su apoyo en este trabajo y me han acompañado en mi desarrollo profesional en el norte de Sinaloa y en otras regiones agrícolas de México.

Con cariño para mi esposa Blanca y mis hijas
Lizbeth y Natalia

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
PREFACIO.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Los modelos dinámicos.....	3
1.1.1. Modelos descriptivos y mecánicos.....	4
1.1.2. Modelos de bañera y múltiples de bañera (compartimento).....	4
1.1.3. Modelos físicos.....	5
1.1.4. Gestión de recursos naturales con modelos dinámicos.....	5
1.2. Hipótesis.....	6
1.3. Objetivos de la tesis.....	6
1.3.1. General.....	6
1.3.2. Específicos.....	6
1.4. Literatura citada.....	7
2. DÉFICIT HÍDRICO EN MAÍZ CONSIDERANDO FENOLOGÍA, EFECTO EN RENDIMIENTO Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA.....	9
2.1. Resumen.....	9
2.2. Introducción.....	10
2.3. Materiales y métodos.....	11
2.3.1. Descripción de la zona de estudio.....	11
2.3.2. Tratamientos y diseño experimental.....	12
2.3.3. Variables medidas.....	14
2.4. Resultados y discusión.....	15
2.4.1. Déficit hídrico-rendimiento.....	15
2.4.2. Relación humedad del suelo- rendimiento.....	19
2.4.3. Componentes de rendimiento.....	21
2.5. Conclusiones.....	24
2.6. Referencias.....	24
3. CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA EL CULTIVO DE MAÍZ BAJO RIEGO DEFICITARIO, EN EL NOROESTE DE MÉXICO.....	27
3.1. Resumen.....	27
3.2. Introducción.....	28
3.2.1. El modelo AquaCrop.....	30
3.3. Materiales y métodos.....	31
3.3.1. Zona de estudio.....	31
3.3.2. Trabajo experimental.....	31
3.3.3. Información requerida.....	33
3.3.3.1. Clima.....	34
3.3.3.2. Cultivo.....	34
3.3.3.3. Suelo.....	37
3.3.3.4. Programas de riego.....	37
3.3.4. Parametrización y calibración.....	38
3.3.5. Evaluación.....	39
3.4. Resultados y discusión.....	40

3.4.1.	<i>Calibración</i>	40
3.4.2.	<i>Validación</i>	42
3.4.3.	<i>Diferencias relativas (Δx)</i>	43
3.5.	Conclusiones.....	44
3.6.	Referencias	44
4.	EFFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS PERIODOS DE SIEMBRA TRADICIONALES DEL DR075, USANDO AQUACROP	47
4.1.	Resumen	47
4.2.	Introducción.....	48
4.3.	Materiales y métodos.....	49
4.3.1.	<i>Descripción de la zona de estudio</i>	49
4.3.2.	<i>Análisis de variabilidad y cambio climático</i>	51
4.3.3.	<i>Parametrización, calibración y validación del modelo</i>	52
4.3.3.1.	<i>Trabajo experimental</i>	52
4.3.3.2.	<i>Parametrización</i>	53
4.3.3.3.	<i>Calibración</i>	53
4.3.3.4.	<i>Validación y aplicación</i>	54
4.4.	Resultados y discusión	55
4.4.1.	<i>Tendencias de cambio climático</i>	55
4.4.2.	<i>Variabilidad climática</i>	57
4.4.3.	<i>Calibración y validación del modelo</i>	57
4.4.4.	<i>Periodos óptimos de siembra</i>	59
4.4.5.	<i>Análisis de productividad</i>	63
4.4.6.	<i>Análisis operativo</i>	65
4.5.	Conclusiones.....	65
4.6.	Referencias	66
5.	BENEFICIOS OPERATIVOS Y PRODUCTIVOS DE LA ELABORACIÓN Y SEGUIMIENTO DE PLANES INTEGRALES DE RIEGO EN DISTRITOS DE RIEGO.....	68
5.1.	Resumen	68
5.2.	Introducción.....	69
5.3.	Materiales y métodos.....	70
5.3.1.	<i>Características de la zona de estudio</i>	70
5.3.2.	<i>Escenarios de disponibilidad hídrica</i>	71
5.3.3.	<i>Plan de riegos tradicional (PRT)</i>	72
5.3.4.	<i>Plan integral de riegos (PIR)</i>	74
5.3.5.	<i>Evaluación</i>	76
5.3.5.1.	<i>Módulo de riego (MR)</i>	76
5.3.5.2.	<i>Área piloto</i>	78
5.4.	Resultados y discusión	79
5.4.1.	<i>Módulo de riego</i>	79
5.4.2.	<i>Área piloto</i>	85
5.4.2.1.	<i>Comparación de coeficientes unitarios (CU)</i>	85
5.4.2.2.	<i>Seguimiento del plan integral</i>	86
5.5.	Conclusiones.....	91
5.6.	Referencias	91
6.	MEJORAMIENTO DEL MONITOREO DE LA FENOLOGÍA DE MAÍZ EN GRANDES ÁREAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO SERIES DE DATOS DE SENSORES REMOTOS.....	94

6.1.	Resumen	94
6.2.	Introducción.....	95
6.3.	Materiales y Métodos	97
6.3.1.	Área de estudio	97
6.3.2.	Análisis climático estacional.....	98
6.3.3.	Serie histórica de imágenes LANDSAT.....	98
6.3.4.	Relación histórica VIS-GDDA	99
6.3.5.	Enfoque metodológico	101
6.3.6.	Validación.....	102
6.4.	Resultados y discusión	102
6.4.1.	Comportamiento histórico del desarrollo del cultivo.....	102
6.4.2.	Modelos espectrales	105
6.4.3.	Monitoreo fenológico apoyado con GIS.....	108
6.4.4.	Precisión de la metodología.....	109
6.5.	Conclusiones.....	111
6.6.	Referencias	112
7.	DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN DEL SERVICIO DE RIEGO PARA GRANDES ZONAS AGRÍCOLAS.....	115
7.1.	Resumen	115
7.2.	Introducción.....	116
7.2.1.	Modelos relacionados con la gestión del servicio de riego	117
7.3.	Materiales y métodos.....	119
7.3.1.	Descripción del modelo tradicional de servicio de riego.....	119
7.3.2.	Identificación de problemas del servicio de riego tradicional.....	120
7.3.3.	Definición de componentes y conceptualización del nuevo modelo de gestión	120
7.3.4.	Selección de herramientas tecnológicas y bases de datos	121
7.3.5.	Estudio y evaluación de los componentes del nuevo modelo	121
7.3.6.	Diseño e integración del nuevo modelo de gestión de servicio de riego	121
7.3.7.	Identificación de impactos potenciales.....	121
7.4.	Resultados y discusión	121
7.4.1.	Problemas del servicio de riego tradicional identificados en la zona de estudio.	121
7.4.2.	Diseño y arquitectura del nuevo modelo de gestión de servicio de riego.....	124
7.4.2.1.	Escenarios de operación	125
7.4.2.2.	Patrón de cultivos.....	127
7.4.2.3.	Periodos óptimos de siembra	127
7.4.2.4.	Plan integral de riegos (PIR).....	129
7.4.2.5.	Seguimiento del plan integral de riegos.....	129
7.4.2.6.	Aplicación de recomendaciones.....	132
7.4.3.	Contribución del modelo a la mejora del servicio de riego tradicional	132
7.5.	Conclusiones.....	134
7.6.	Referencias	134
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
8.1.	Generales	137
8.2.	Específicas por componente	137
	APÉNDICE A	140
	APÉNDICE B	144
	APÉNDICE C	148

APÉNDICE D	151
APÉNDICE E.....	154

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Descripción de tratamientos para la evaluación de estrés hídrico en maíz basado en etapas fenológicas.	13
Cuadro 2.2. Variación de la evapotranspiración (ETa) (mm) y el déficit hídrico (DH) en ocho intervalos de fases fenológicas de maíz y su efecto en rendimiento (Ya), en cinco tratamientos de estrés basados en fenología, en el norte de Sinaloa, México.	15
Cuadro 2.3. Lámina neta (Ln), Lámina bruta (Lb) y Eficiencias de aplicación (EA) en cinco tratamientos de estrés hídrico en maíz basado en fenología, en el norte de Sinaloa, México.	18
Cuadro 2.4. Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento del cultivo de maíz en cinco tratamientos de estrés en el norte de Sinaloa, México.	20
Cuadro 2.5. Diferencias relativas (%) con respecto al testigo de las variables rendimiento (Ya), lámina bruta (Lb), eficiencia de aplicación (EA) y productividad del agua (PA), en cuatro tratamientos de estrés hídrico basado en etapas fenológicas en maíz, en el norte de Sinaloa, México.	23
Cuadro 3.1. Descripción de tratamientos.	32
Cuadro 3.2. Parámetros conservativos y no conservativos reportados para la calibración de AquaCrop en maíz.	36
Cuadro 3.3. Características hidráulicas promedio del suelo del lote experimental del INIFAP-CEVAF.	37
Cuadro 3.4. Resumen de riegos aplicados en cuatro niveles de déficit hídrico en maíz en el lote experimental INIFAP-CEVAF en los ciclos OI 2017/2018 y 2018/2019.	38
Cuadro 3.5. Valores y forma de determinación de los parámetros conservativos y no conservativos del modelo AquaCrop, calibrados para maíz bajo condiciones óptimas de riego y nitrógeno, durante el ciclo OI 2018/2019 en el norte de Sinaloa, México.	40
Cuadro 3.6. Diferencias relativas (Δx) (%) de variables agronómicas medidas y simuladas con AquaCrop en maíz, bajo riego deficitario en dos ciclos agrícolas Otoño-invierno (OI), en el norte de Sinaloa, México.	44
Cuadro 4.1. Variables utilizadas para agrupación climática por temperatura del aire de los principales cultivos del DR-075, Río Fuerte, Sinaloa.	52
Cuadro 4.2. Temperatura máxima, media y mínima (o C) en siete periodos de tiempo y anomalías térmicas con respecto al periodo de referencia (1983-2012), en el norte de Sinaloa.	56
Cuadro 4.3. Variación de la temperatura diurna (Td) (o C) en la superficie en tres periodos de tiempo en el norte de Sinaloa, México.	56
Cuadro 4.4. Parámetros conservativos y no conservativos para la calibración del modelo AquaCrop en los principales cultivos del norte de Sinaloa, México.	58
Cuadro 4.5. Variables de crecimiento medidas versus modeladas con AquaCrop de tres cultivos bajo condiciones óptimas de manejo.	59
Cuadro 4.6. Comparación de fecha de siembra tradicional (FST) con fechas de siembra estimadas con AquaCrop (día-juliano) para los principales cultivos ciclo otoño-invierno (OI) del DR075.	63
Cuadro 5.1. Cálculo de los coeficientes unitarios de riego (CU) para la elaboración del plan de riego tradicional (PRT) (IMTA, 2014).	73
Cuadro 5.2. Patrón de cultivos realizados en el MR Batequis II-3, DR075 y disponibilidad hídrica presentada en el sistema de presas, en los ciclos OI 2012/2013 al 2018/2019.	77
Cuadro 5.3. Comparación de superficies de siembra y hectáreas riego reales y calculadas con las metodologías típica e integral de los principales cultivos ciclo OI 2018/2019 del MR Batequis II-3, DR075.	84
Cuadro 5.4. Volúmenes y láminas netos (toma-granja) calculadas con la metodología PlanDR e integral y reportados en el ciclo OI 2018/2019, de los principales cultivos del MR Batequis II-3, DR075.	84

<i>Cuadro 5.5. Coeficientes unitarios acumulados y sus correspondientes superficie física, hectáreas riego y volúmenes netos para maíz, frijol y garbanzo, calculados con la metodología típica (PlanDR) e integral en área modelo del MR Batequis II-3, DR075.</i>	85
<i>Cuadro 5.6. Comparación de variables medidas en áreas piloto y convencional, durante el seguimiento del plan integral de riegos en maíz.</i>	91
<i>Cuadro 6.1. Fases de desarrollo, grados-día desarrollo acumulados (GDDA) y desarrollo fenológico (DF) para los híbridos de maíz más utilizados en el norte de Sinaloa, México.</i>	100
<i>Cuadro 6.2. Clasificación de años [Frío (F), Neutros (N) y Calientes (H)] para indicar el efecto histórico de la temperatura en el desarrollo fenológico del maíz expresado en GDDA (° C) y duración del ciclo (DUR) en días, establecidos en tres períodos de siembra (temprana, tardía y típica) para los años agrícolas analizados.</i>	104
<i>Cuadro 6.3. Parámetros de la ecuación tipo $DF=f(VI)=\alpha_1\pm\alpha_2+(\alpha_3*VI)0.5$, para $VI\leq VI_{m\acute{a}x}$, de lo contrario $DF=DF_{VT}$, para estimar Desarrollo Fenológico (DF) como función de Índices de Vegetación (VIs) considerando dos zonas de desarrollo del maíz. Zona I: ecuación con signo negativo (-) para la raíz cuadrada. Zona II: ecuación con signo positivo (+) para la raíz cuadrada.</i>	107
<i>Cuadro 6.4. Valores Mínimos y Máximos de NDVI y EVI y su relación con el Desarrollo Fenológico (DF) y fases de desarrollo del maíz, localizados en dos zonas y en el máximo punto de la curva de desarrollo, usados el monitoreo fenológico a gran escala.</i>	107
<i>Cuadro 7.1. Descripción de algunos modelos relacionados con la gestión del servicio de riego.</i>	117
<i>Cuadro 7.2. Problemas del servicio de riego tradicional identificados en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa.</i>	122
<i>Cuadro 7.3. Escenarios de operación del modelo de gestión del servicio de riego.</i>	126
<i>Cuadro 7.4. Periodos óptimos de siembra y rendimiento máximo en el período (Yx), en tres escenarios térmicos para los cultivos más importantes ciclo OI del DR075 “Valle del Fuerte”, Sinaloa.</i>	128
<i>Cuadro 7.5. Contribución estimada del nuevo modelo de gestión de servicio de riego, a la solución de problemas del servicio de riego tradicional en el DR075, Río Fuerte, Sinaloa.</i>	133

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Comparación del rendimiento medido (Y_a) y rendimiento estimado (Y_{EST}) en cinco tratamientos de estrés hídrico en maíz, en el norte de Sinaloa, México.</i>	16
<i>Figura 2.2. Productividad del agua en cinco tratamientos de estrés hídrico basados en fenología en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa, México.</i>	19
<i>Figura 2.3. Variación de la humedad del suelo estimada y observada antes del riego, en cuatro tratamientos de estrés hídrico en maíz basado en fenología.</i>	21
<i>Figura 2.4. Producción de materia fresca (a) y materia seca (b) de cinco partes de la planta de maíz, sometidos a cinco tratamientos de estrés hídrico basados en fenología.</i>	22
<i>Figura 2.5. Índice de cosecha en cinco tratamientos de estrés hídrico basado en etapas fenológicas en el cultivo de maíz, en el norte de Sinaloa, México.</i>	23
<i>Figura 3.1. Componentes principales del modelo AquaCrop del continuo suelo-planta-atmósfera y parámetros asociados (Adaptada de Steduto et al., 2012).</i>	31
<i>Figura 3.2. Distribución de tratamientos en lote experimental de maíz OI 2017/2018 para la parametrización del modelo AquaCrop.</i>	32
<i>Figura 3.3. Lote experimental de maíz bajo riego por goteo para la determinación de parámetros no conservativos de AquaCrop.</i>	33
<i>Figura 3.4. Temperatura y lluvia registradas durante los ciclos de calibración OI 2017/2018 y 2018/2019 del modelo AquaCrop, en el norte de Sinaloa.</i>	34
<i>Figura 3.5. Estimación de la cobertura del dosel (CCi) con Drone utilizando el método OBIA (Object-based image analysis).</i>	38
<i>Figura 3.6. Comparación de la cobertura del dosel medida y simulada con AquaCrop en cuatro niveles de estrés (R) en dos ciclos de calibración.</i>	42
<i>Figura 3.7. Rendimiento observado contra rendimiento simulado con AquaCrop en maíz bajo cuatro tratamientos de déficit hídrico en dos ciclos agrícolas.</i>	42
<i>Figura 3.8. Correlación cobertura de dosel CCi (a) y rendimiento (b) observados y simulados en maíz sometido a estrés hídrico.</i>	43
<i>Figura 4.1. Ubicación de la zona de estudio</i>	50
<i>Figura 4.2. Comportamiento histórico de la acumulación de GDD de maíz, frijol y papa, y su relación con el tipo de ciclo OI [frío (F), neutro (N) o caliente (C)], en el DR075.</i>	57
<i>Figura 4.3. Producción de biomasa, rendimiento de grano y períodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos para maíz en el DR-075.</i>	60
<i>Figura 4.4. Producción de biomasa, rendimiento de grano y períodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos para frijol en el DR-075.</i>	61
<i>Figura 4.5. Producción de biomasa, tubérculos y períodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos para papa en el DR075.</i>	62
<i>Figura 4.6. Brecha de rendimiento actual estimada (%) de los principales cultivos del DR075, respecto al rendimiento máximo (Y_x) en tres escenarios climáticos</i>	64
<i>Figura 4.7. Fechas de siembra-rendimiento de 17 parcelas comerciales de maíz ciclo OI 2018-2019 y su ubicación respecto al periodo de siembra óptimo</i>	64
<i>Figura 4.8. Superficie sembrada decenal de 17 parcelas de maíz en dos ciclos otoño-invierno (OI) contrastantes, y su relación con los periodos óptimos de siembra de tres escenarios climáticos en el módulo de riego Batequis II-2, DR075.</i>	65
<i>Figura 5.1. Almacenamiento histórico de agua en el sistema de presas de la cuenca del Río Fuerte, Sinaloa.</i>	71
<i>Figura 5.2. Ubicación del módulo de riego Batequis II-3, DR075 y área piloto (amarillo) para seguimiento y evaluación del plan integral de riegos (PIR).</i>	76

<i>Figura 5.3. Superficie sembrada decenal de los principales cultivos OI 2017/2018 del módulo de riego Batequis II-3, DR075.</i>	77
<i>Figura 5.4. Consultas dinámicas de variables hídricas en la plataforma GDD</i>	78
<i>Figura 5.5. Distribución decenal de superficie sembrada en área piloto ciclo OI 2017/2018 usada para la elaboración del PIR. En el MR Batequis II-3, DR075.</i>	79
<i>Figura 5.6. Coeficientes unitarios de superficie física (CUSF) calculados con la metodología tradicional (PlanDR) y con la metodología integral de los principales cultivos del MR Batequis II-3, DR075.</i>	80
<i>Figura 5.7. Coeficientes decenales de hectáreas riego (CUHR) típicos y calculados con la metodología típica (PIR) para cuatro cultivos del MR Batequis II-3, DR075.</i>	81
<i>Figura 5.8. Coeficientes decenales de volumen neto (CUVN) típicos y calculados con la metodología integral (PIR) para cuatro cultivos del MR Batequis II-3, DR075.</i>	82
<i>Figura 5.9. Gasto (a) y volúmenes (b) decenales demandados conjuntamente por maíz (4RA), frijol, papa y garbanzo, calculados con las metodologías típica e integral, y volumen total integrado por cultivo y por ciclo (c) estimados con las dos metodologías en el MR Batequis II-3, DR075.</i>	83
<i>Figura 5.10. Escenario climático presente durante el ciclo de evaluación OI 2018/2019.</i>	86
<i>Figura 5.11. Distribución de superficies de siembra planeadas y efecto de lluvia en superficie real sembrada en sección modelo.</i>	87
<i>Figura 5.12. Hectáreas riego planeadas (típica e integral) y proyectadas con la plataforma GDD a partir de un escenario de desfase (arriba). Hectáreas riego proyectadas y realizadas (abajo) en área piloto.</i>	88
<i>Figura 5.13. Volumen (arriba) y gasto neto (abajo) proyectados (a partir de un escenario de desfase) y realizados en área piloto del módulo de riego Batequis II-3, DR075.</i>	89
<i>Figura 5.14. Lámina neta (Ln) y lámina bruta (Lb) de parcelas de maíz y su relación con la eficiencia de aplicación (EA) en áreas piloto (arriba) y área con manejo convencional (abajo).</i>	90
<i>Figura 6.1. Ubicación del área de estudio.</i>	97
<i>Figura 6.2. Número y tipo de imágenes LANDSAT usadas en el área de estudio.</i>	99
<i>Figura 6.3. Esquema secuencial de la metodología generada</i>	102
<i>Figura 6.4. Grados-día desarrollo acumulados (GDDA) en ciclos OI para cada imagen LANDSAT en parcelas de referencia, cada siembra se muestra en un color único y el tipo de año como Frío (F), Neutro (N) y Caliente (C) en los años analizados.</i>	103
<i>Figura 6.5. Comparación del desarrollo del cultivo estimado con GDDA en la fecha de imagen LANDSAT y el desarrollo observado en parcelas de referencia de maíz (ciclo OI 2017/2018), DF calculado como la relación entre los GDDA actuales y los GDDA a madurez fisiológica.</i>	105
<i>Figura 6.6. Valores históricos de NDVI (a) y EVI (b) y su relación con el desarrollo fenológico (DF) para el maíz, en el norte de Sinaloa, México.</i>	106
<i>Figura 6.7. Relación EVI-NDVI utilizando datos de sensores remotos en maíz del período de 1998 a 2018 en el Distrito de Riego (DR) 075.</i>	108
<i>Figura 6.8. Relación del desarrollo fenológico (DF) observado y modelado en parcelas de referencia ciclo OI 2017-2018. Modelo espectral NDVI (a) y EVI (b) en el Distrito de Riego (ID) 075, al norte del estado de Sinaloa, México.</i>	109
<i>Figura 6.9. Fenología del maíz observada (a), precisión del modelo espectral utilizando NDVI y EVI (b) en dos fechas contrastantes (11 de enero y 17 de abril de 2018), en el módulo de riego Batequis II-3, DR075.</i>	111
<i>Figura 7.1. Proceso para recibir el servicio de riego en módulos de riego del Distrito de Riego (DR) 075</i>	120
<i>Figura 7.2. Esquema general del modelo de gestión del servicio de riego</i>	125
<i>Figura 7.3. Escenarios de operación considerados en el modelo de gestión</i>	126
<i>Figura 7.4. Criterios para la definición del patrón de cultivos</i>	127
<i>Figura 7.5. Selección de periodos óptimos de siembra de acuerdo al escenario térmico</i>	128
<i>Figura 7.6. Elaboración del plan integral de riegos</i>	129

<i>Figura 7.7. Seguimiento del plan integral de riegos.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 7.8. Seguimiento del plan integral con plataforma GDD</i>	<i>130</i>
<i>Figura 7.9. Seguimiento del plan integral de riegos apoyado con percepción remota</i>	<i>131</i>
<i>Figura 7.10. Aplicación de recomendaciones en parcela.....</i>	<i>132</i>

RESUMEN

La alta competencia por el agua, sequías prolongadas, intensificación de la variabilidad climática y la ineficiencia de la gestión del servicio de riego, son problemas recurrentes que enfrentan las zonas de riego de México, impactando negativamente en su productividad y conservación de los recursos hídricos. El objetivo del presente trabajo de investigación fue generar un nuevo modelo de gestión del servicio de riego que contribuya a incrementar la resiliencia de las zonas de riego a estos escenarios, utilizando las tecnologías: modelación del desarrollo de cultivos, planeación integral de riegos (PIR) basado en Grados-día desarrollo (GDD) y seguimiento de PIR considerando variables ambientales, apoyado con imágenes de satélite. El trabajo se realizó en el Distrito de Riego (DR) 075, norte de Sinaloa, en un área de 20000 ha, en dos módulos de riego (MR) y en el Campo Experimental Valle del Fuerte del INIFAP. El nuevo modelo quedó estructurado por cinco componentes principales: 1) escenarios de operación, 2) selección del patrón de cultivos, 3) periodos óptimos de siembra, 4) plan integral de riegos y 5) seguimiento del PIR apoyado con percepción remota. Cada componente se estudió y calibró experimentalmente aportando información importante para la mejora del servicio de riego tradicional. Se utilizó información histórica de clima, disponibilidad hídrica e imágenes de satélite LANDSAT, así como las tecnologías AquaCrop, programación de riego basada en GDD y percepción remota para el monitoreo fenológico de cultivos. Se propusieron nueve posibles escenarios de operación para manejarse con el modelo, se estimaron periodos óptimos de siembra con AquaCrop para los principales cultivos bajo tres escenarios climáticos (Frío, Neutro y Caliente). Se generaron y evaluaron metodologías para la elaboración de PIR y su seguimiento con una plataforma GDD apoyada con imágenes de satélite en un Sistema de Información Geográfica (GIS). Se encontró un incremento en la eficiencia de aplicación del 10.7% y de 2.3 % en rendimiento en parcelas de maíz de una sección piloto donde se dio seguimiento al PIR con la plataforma GDD. El rango de precisión de la metodología para el monitoreo fenológico de maíz a gran escala con imágenes LANDSAT fue de 87 a 93%. Aunque se logró diseñar el nuevo modelo de gestión bajo un enfoque integral, se requiere su automatización e iniciar un proceso de implantación en las zonas de riego de México.

Palabras clave: Variabilidad climática, modelación de cultivos, periodos óptimos de siembra, planeación integral y seguimiento del plan integral, eficiencia de aplicación, productividad de cultivos.

SUMMARY

High competition for water, prolonged droughts, intensification of climatic variability and inefficiency in management of the irrigation service are recurring problems that irrigated areas of Mexico face every year, with negative consequences in productivity and conservation of water resources. The aim of this research work was to generate a new irrigation service management model to increase the resilience of irrigation areas to these scenarios, using crop modeling, integral irrigation planning (IIP) based on growing degree-days (GDD) and IIP monitoring considering environmental variables supported with satellite images. The work was carried out in the central part of the Irrigation District (DR) 075, north of Sinaloa, in an area of 20000 ha, in two user associations “irrigation modules” (IM) and in the “Valle del Fuerte” Experimental Field of the INIFAP. The new model was structured by five main components: 1) operation scenarios, 2) selection of the crop pattern, 3) optimal sowing periods, 4) irrigation integral planning and 5) monitoring of the IIP supported with remote sensing. Each component was studied and experimentally calibrated, providing important information for the traditional irrigation service improvement. Historical information on climate, water availability and LANDSAT satellite images were used, as well as the technologies: AquaCrop model, GDD-based irrigation scheduling and remote sensing for phenological crops monitoring. Nine possible operation scenarios were proposed to be managed with the model, optimal sowing periods were estimated with AquaCrop for the main crops under three climatic scenarios (Cold, Neutral and Hot). Methodologies were generated and evaluated for IIP elaboration and its monitoring with a GDD platform supported with satellite images in a Geographic Information System (GIS). An increase in application efficiency of 10.7% and 2.3% in yield was found in corn plots of a pilot section where the IIP was followed with the GDD platform. The precision range of the methodology for large-scale corn phenological monitoring with LANDSAT images was 87-93%. Although it was possible to design the new management model under an integral approach, it is required to automate it and initiate an implementation process in the irrigation areas of Mexico.

Keywords: *Climatic variability, crop modeling, optimal planting periods, integral planning and monitoring of the integral plan, application efficiency, crop productivity.*

PREFACIO

Las zonas de riego de México desde su formación han experimentado cambios constantes derivados de factores climáticos, agronómicos, edáficos, operativos, políticos y sociales que se agudizan por las bajas eficiencias en el servicio de riego. Tradicionalmente la adaptación a estos cambios se ha hecho con acciones empíricas poco efectivas y en la mayoría de los casos con la aportación de recursos a través de programas gubernamentales. Con el fin de incrementar la capacidad de resiliencia de las zonas agrícolas a estos cambios, se generó un nuevo modelo de gestión del servicio de riego, cuyo desarrollo se describe en el presente manuscrito.

La tesis cuenta con ocho capítulos, en el primero se presenta una introducción general a los temas de investigación, así como la hipótesis, objetivo general, objetivos específicos y literatura citada. El capítulo dos se consideró tema transversal ya que aporta al resto de los capítulos, información científica relacionada con estrés hídrico, fenología y manejo de escenarios de disponibilidad hídrica. Los capítulos tres y cuatro se vincularon al primer objetivo para la determinación de períodos óptimos de siembra en condiciones climáticas contrastantes utilizando el modelo AquaCrop. En el capítulo cinco se atendió el segundo objetivo para la generación de una metodología para la elaboración y seguimiento de planes integrales de riego (PIR) incorporando grados día-desarrollo (GDD) y variables ambientales, demostrando sus impactos positivos no solo en eficiencias de riego sino también rendimiento y calidad en uno de los cultivos más sensibles al manejo del riego como lo es la papa (Apéndice D).

En el capítulo seis se desarrolló la metodología para el monitoreo de la fenología de cultivos usando imágenes de satélite, como apoyo al seguimiento del plan integral y servicio de riego en grandes zonas agrícolas, con lo cual se cumplió con el tercer objetivo. El capítulo siete muestra el nuevo modelo para la gestión del servicio de riego y la forma como se integraron al modelo tradicional los componentes: modelación de cultivos, planeación integral de riegos basado en GDD y seguimiento de planes integrales apoyado con imágenes de satélite, así como sus fortalezas y limitaciones. En el capítulo ocho se presentan las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo de investigación, así como las conclusiones y recomendaciones de cada componente del modelo.

Ernesto Sifuentes-Ibarra

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes regiones de riego son las principales productoras de alimentos en el mundo para poder satisfacer la demanda de una población en constante crecimiento donde los problemas de alimentación y pobreza se mantienen a pesar del incremento de la infraestructura hidroagrícola de las últimas décadas (Bos et al., 2005). En México, este problema está relacionado con la baja inversión en investigación agrícola de las últimas tres décadas (0.55% del Producto Interno Bruto) y poca participación del sector empresarial, lo que ha provocado una rezaga en la generación de conocimiento y fuerte dependencia tecnológica del extranjero (Guadarrama, 2018).

Las áreas destinadas a la agricultura de riego en México superan las seis millones de hectáreas y son operadas principalmente por distritos (DR) y módulos de riego (MR), los más extensos y productivos se encuentran en la región noroeste cuya economía depende de la agricultura, como el DR075 con casi 300000 ha cosechadas anualmente y el mayor productor de maíz con rendimiento medio de 12.5 t ha⁻¹ y una producción entre las cinco a siete millones de toneladas por año (SIAP, 2018; SIAP, 2019).

Los periodos de sequías cada vez más frecuentes, la intensificación de la variabilidad climática, presencia de eventos climáticos atípicos como heladas e inundaciones, y las bajas eficiencias en el manejo y servicio de riego, han limitado la capacidad de resiliencia de estas regiones ante estos escenarios, poniendo en riesgo su estabilidad productiva, económica y social. De acuerdo a datos oficiales, la eficiencia global de los distritos de riego en estas zonas, es de 33.9% (Olmedo-Vázquez et al., 2017), el resto se pierde por escorrentía, percolación y evaporación arrastrando suelo, fertilizantes móviles y otros contaminantes (Sifuentes-Ibarra et al., 2015a). Un estudio realizado en 2015 por el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE) ubicó al norte de Sinaloa como de media a alta vulnerabilidad ambiental ante las sequias; y de vulnerabilidad muy alta a la mayoría de las zonas de riego de Sonora y Baja California, lo cual ha provocado la disminución de la intensidad del uso de la tierra al concentrar la superficie sembrada en el ciclo otoño-invierno (OI), con una fuerte reducción en el ciclo primavera-verano (PV) (CONAGUA, 2015). Estudios recientes sobre cambio climático en el norte de Sinaloa reportan una tendencia del incremento de la temperatura de 1 a 2 ° C con respecto al periodo base 1961-1990 y una reducción de la precipitación (Castillo et al., 2017; Lobato-Sánchez & Altamirano-Del-Carmen, 2017).

El efecto más importante que provocará esta tendencia, es el acortamiento de ciclos fenológicos de la mayoría de los cultivos, debido a una acumulación más rápida de los requerimientos de calor, con impactos negativos en la gestión y productividad de las zonas de riego (Ojeda-Bustamante et al., 2014). Ante estos escenarios se requiere de herramientas tecnológicas validadas localmente, que ayuden a minimizar estos impactos, ya que las acciones que comúnmente son empíricas o no cuentan con el soporte científico suficiente. En este sentido, los modelos de simulación del desarrollo de cultivos, la programación y seguimiento del riego considerando variabilidad climática y el uso de imágenes de satélite (percepción remota) para el monitoreo fenológico de cultivos, han demostrado tener una alta probabilidad de éxito en las grandes zonas de riego de manera individual. La modelación de cultivos permite generar información de todo el sistema biológico y de producción agrícola, mediante la utilización eficiente de recursos considerando variabilidad y cambio climático, suelo, secuestro de carbono; así como los efectos a largo plazo en la seguridad alimentaria y sostenibilidad del medio ambiente (Hernández et al., 2009). El modelo AquaCrop es de los más recientes modelos relacionados con la ingeniería de riego, con las ventajas de ser dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua (Steduto et al., 2012).

La programación integral del riego es una tecnología que utiliza los parámetros: coeficiente de cultivo (K_c), profundidad de raíz (P_r) y factor de abatimiento o máximo déficit permitido (MDP) como funciones no lineales, cuya variable independiente (x) son los grados-día desarrollo acumulados (GDDA) para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos, por lo que se puede adaptar a variabilidad climática y a escenarios de disponibilidad hídrica mediante el acoplamiento de las etapas más sensibles al riego. Esta metodología se desarrolló y aplicó por primera vez en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el DR075 y ha sido adaptado para otros cultivos como maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y nogal pecanero (*Carya illinoensis*) (Ojeda et al., 2004; Ojeda-Bustamante et al., 2006; Sifuentes- Ibarra et al., 2015c; Mendoza-Pérez et al., 2019) para operarse a través de una plataforma computacional a través de internet (Sifuentes-Ibarra et al., 2015b).

La percepción remota es una técnica ampliamente aceptada para obtener información sobre las propiedades físicas o químicas de ciertas superficies u objetos a distancia mediante imágenes obtenidas por sensores montados en dispositivos móviles como satélites y drones, que captan la energía reflejada o emitida en algunas regiones del espectro electromagnético (Jensen, 2007).

Reed et al. (1994) evaluaron el manejo de la variabilidad de la fenología utilizando el NDVI derivado del satélite National Oceanic and Atmospheric Administration's Advanced Very High Resolution Radiometer, encontrando una fuerte relación entre las métricas derivadas del satélite y las características fenológicas predichas, especialmente en las variaciones interanuales de trigo de primavera. Viña et al. (2004) relacionaron los GDDA de maíz con el contenido de clorofila y los VIs VARI_{green}, VARI_{red-edge} y NDVI derivados de un sistema de fibra-dual de radiómetros para coleccionar datos en el rango de 400 a 900 nm; concluyeron que los VARI son más sensibles que el NDVI con la fracción verde de vegetación, además usando VARI es posible detectar con anticipación los cambios fisiológicos en el maíz y puede usarse para la detección temprana del estrés; recomendaron también que estos resultados pueden usarse en grandes áreas mediante imágenes de satélite como MODIS, MERIS y SeaWiFS.

Wei et al. (2019) desarrollaron una metodología para la identificación de cultivos en grandes áreas con sensores remotos considerando el rol de la fenología y topografía, señalaron que el uso de series de tiempo de imágenes adquiridas de sensores remotos ha ayudado a la identificación de la variación de la fenología de plantas y un mayor número de cultivos, pero requiere mayor análisis en regiones montañosas. Utilizaron series de tiempo de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y un clasificador forestal para mapear 12 tipos de cultivos, así como los VIs MODIS-EVI y NDVI, encontrando mejor respuesta de EVI que NDVI (85% versus 81% de exactitud). Mencionan también que las series de tiempo de imágenes LANDSAT y SENTINEL también proveen un efectivo mapeo de cultivos.

En el presente trabajo de investigación se generó un nuevo modelo de gestión de servicio de riego dinámico y bajo un enfoque integral, incorporando estas tres tecnologías al modelo tradicional de servicio de riego. Cada herramienta tecnológica fue calibrada y validada experimentalmente con los principales cultivos y sistemas de producción de la zona de estudio, permitiendo manejar escenarios climáticos y de operación contrastantes contribuyendo a mejorar el servicio de riego y la productividad de cultivos.

1.1. Los modelos dinámicos

Ellner & Guckenheimer (2006), definieron a los modelos dinámicos como representaciones simplificadas de algunas entidades del mundo real en ecuaciones o códigos computacionales. Estos modelos reproducen algunas características esenciales del sistema en estudio, y dejan fuera las no

esenciales. Los modelos dinámicos en las ciencias biológicas son diversos y utilizados de diferentes maneras, incluyendo:

1. Investigación en el área de la biología: fisiología celular, prevalencia de enfermedades y especies en peligro de desaparecer, entre otras
2. Ajuste matemático del modelo: variables del modelo de tiempo continuo o discreto, variables de dimensión finita o infinita y modelos determinísticos o estocásticos.
3. Métodos para estudiar el modelo: análisis matemático, simulación computarizada, estimación y validación de parámetros a partir de datos
4. El propósito del modelo: ciencia fundamental, medicina, manejo del medio ambiente, etc.

Entre los principales modelos se encuentran los modelos descriptivos y mecanísticos, modelos de bañera, múltiples de bañeras (compartimentos) y modelos físicos.

1.1.1. Modelos descriptivos y mecanísticos

Los modelos descriptivos muestran las relaciones de observaciones cuantitativas con las variables medidas, pero no explican el efecto de factores no considerados. Este tipo de modelos proveen mucha información pero tienen las siguientes limitantes: no explican la relación entre variables, por ejemplo en estudios que muestran la relación de la población del salmón con la densidad del camino, sin embargo, no se consideran otros factores como la contaminación por fertilizantes. También suelen ser específicos para las condiciones donde se generaron (Ellner & Guckenheimer (2006)). Los modelos mecanísticos, a diferencia de los descriptivos, asumen que un sistema complejo puede entenderse examinando el funcionamiento de sus partes y la manera en que se unen. En este tipo de modelos los componentes son reales, sólidos y visibles explicando las causas de los efectos (Craver, 2006).

1.1.2. Modelos de bañera y múltiples de bañera (compartimento)

Los modelos de bañera cuentan con variables de estado, por ejemplo la cantidad de agua que entra a un recipiente en función del tiempo de llenado. En este tipo de modelos una ecuación dinámica debe ser capaz de calcular los cambios a través del tiempo, considerando este como una variable continua a intervalos pequeños de tiempo. Si se conectan varios modelos de este tipo, se obtiene un modelo de compartimento. Las variables de estado en un modelo de compartimento son la cantidad de algunas cosas en distintas categorías (compartimentos) dentro del sistema, por ejemplo,

el nivel de plomo en la sangre, la cantidad de nitrógeno en diversas capas de suelo o la cantidad de moléculas de agua en un recipiente en diversos periodos de tiempo.

1.1.3. Modelos físicos

En los modelos de compartimento la ley física que se utiliza es la de conservación de masa, por su parte los modelos físicos en biología utilizan las leyes de la mecánica; las variables de los modelos son la posición y velocidades, y las ecuaciones de la dinámica provienen de las leyes del movimiento de Newton. Estos modelos generalmente se utilizan para estudiar el movimiento de animales y del ser humano, midiendo variables como gravedad, forma del esqueleto y masa corporal (Ellner & Guckenheimer, 2006).

1.1.4. Gestión de recursos naturales con modelos dinámicos

Bithell & Brasington (2009), desarrollaron un modelo para la gestión de recursos naturales acoplando modelos de agricultura de subsistencia basados en agentes, con modelos forestales y modelos dinámicos de distribución del agua. El modelo se enfocó a comunidades agrícolas de subsistencia, las cuales dependen del rol que tiene el clima (fluctuación espacio-temporal de lluvia), crecimiento de cultivos, desmontes y otros componentes del ciclo hidrológico. El modelo fue un prototipo acoplando modelación de sistemas para simular los cambios en uso de suelo a través de tres modelos simples: 1) un modelo de subsistencia agrícola basado en agentes, 2) un modelo individual basado en dinámica forestal y c) un modelo hidrológico explícito espacialmente, que predice la humedad del suelo distribuida y los flujos de agua a escala de cuenca. Se realizaron una serie de experimentos para analizar el comportamiento de los componentes del modelo sistema, incorporando gradualmente el número de estos. Este sistema de modelos ayudó a evaluar los impactos demográficos en la deforestación, corrientes hidrológicas y en la disponibilidad de agua. Otro ejemplo de modelos integrales para la solución de problemas complejos de recursos naturales es la dinámica de sistemas, Winz et al. (2009) utilizaron esta herramienta para la simulación del manejo de recursos hídricos y la solución de problemas de planificación regional y gestión de cuencas hidrográficas, así como gestión de aguas urbanas. La dinámica del sistema combinada con la participación de las partes interesadas proporciona una metodología para abordar estos problemas de manera eficaz. Concluyeron que a pesar de varias limitaciones, la dinámica de sistemas es adecuada para aplicaciones multidisciplinarias cuando existe participación de grupos interesados delimitando los problemas a estudiar, también señalaron que el uso cuidadoso de la

dinámica de sistemas presenta una importante oportunidad de mejorar las estrategias de gestión del agua, mejorando la resiliencia del sistema en su conjunto.

1.2. Hipótesis

La incorporación de tecnologías de última generación al modelo tradicional de servicio de riego, como modelación de cultivos, plataformas para la elaboración y seguimiento de planes de riego basadas en GDD y percepción remota, permitirá manejar escenarios de operación contrastantes generando una mejora del servicio de riego y productividad de cultivos de las grandes zonas de riego de México.

1.3. Objetivos de la tesis

1.3.1. General

Generar un modelo de gestión del servicio de riego para grandes zonas agrícolas, que integre modelación del desarrollo de cultivos, planeación integral de riegos basado en GDD y seguimiento de planes integrales considerando variables ambientales, apoyado con imágenes de satélite, capaz de adaptarse a escenarios contrastantes de operación.

1.3.2. Específicos

1. Calibrar el modelo AquaCrop para la definición de períodos óptimos de siembras considerando escenarios climáticos contrastantes, que coadyuve a la mejora del servicio de riego y productividad de cultivos
2. Desarrollar una metodología para la elaboración y seguimiento de planes integrales de riego (PIR) de corto plazo en grandes zonas agrícolas, incorporando grados día-desarrollo (GDD) y variables ambientales
3. Desarrollar una metodología para el monitoreo de la fenología de cultivos usando imágenes de satélite, como apoyo al seguimiento del plan integral y servicio de riego en grandes zonas agrícolas
4. Generar un nuevo modelo para la gestión del servicio de riego para grandes zonas agrícolas bajo un enfoque integrado, capaz de operar en escenarios de operación contrastantes (climáticos y disponibilidad hídrica), utilizando modelación de cultivos, planeación integral de riegos basado en GDD y seguimiento de planes integrales apoyado con imágenes de satélite.

1.4. Literatura citada

- Bos, M.G., Burton, M.A. & Molden. D.J. (2005). Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines. 1a. edición. Cabi Publishing. Cambridge, USA. 158pp
- Bithell, M. & Brasington, J. (2009). Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution. *Environmental Modelling & Software* 24 (2009) 173–190, Doi:10.1016/j.envsoft.2008.06.016.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L.A., Valdés, J.B., Arteaga-Ramírez, R. y Vázquez-Peña MA. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tec. y Ciencias del Agua, IMTA*, 8 (1): 35-52. ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Programa Nacional Contra la Sequía. Extraída de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contra-la-sequia-monitoreo-de-la-sequia-64594>.
- Craver, C.F. (2006). When mechanistic models explain. *Synthese* 153, 355–376 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11229-006-9097-x>
- Ellner, S.E. & Guckenheimer, J. (2006). *Dynamic Models in Biology*. Princeton University Press, Library of Congress Cataloging in Publication Data. ISBN 13: 978-0-691-118-43-7. USA
- Guadarrama-Atrizco, V.H. (2018). Inversión para Ciencia , Tecnología e Innovación en México. *Incytu*, 52(11), 1–6.
- Hernández, N, Soto, F. y Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: características y usos. *Cultivos tropicales*. ISSN: 0258-5936. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Cuba. 30 (1). Pp 73-82
- Jensen, J.R. (2007). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. Segunda edición. p.cm. – (Prentice Hall series in geographic information science). ISBN 0-13-188950-8. USA. 592pp.
- Lobato-Sánchez, R, y Altamirano-Del-Carmen, M.A. (2017). Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 101–116. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-07>
- Mendoza-Pérez, C., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Quevedo-Nolasco, A., Flores-Magdaleno, H., Ramírez-Ayala, C. y Ascencio-Hernández, R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante atmómetro con fines de calendarización de riego. *Idesia (Arica)*, 37(4), 65–72. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019000400065>
- Ojeda, B.W., Sifuentes; I.E., Slack, D.C. & Carrillo, M. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53:521-261. USA.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia (Mexico)* 40 (1): 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W, Sifuentes-Ibarra, E., Ontiveros, C.R.E., Iñiguez, C.M. y Rojano, A.A. (2014). Proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa. In: Sinaloa y el cambio climático global; Flores-Campaña LM et al. (eds), pp: 115-131. Instituto de Apoyo a la

- Investigación e Innovación y Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.
- Olmedo-Vázquez, V.M., Minjares-Lugo, J.L., Camacho-Poyato, E., Hernández-Hernández, M.L. y Rodríguez-Díaz, J.A. (2017). Uso del análisis envolvente de datos (DEA) para evaluar la eficiencia de riego en los módulos del distrito de riego no. 041, río yaqui (sonora, México). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(2), 127–148.
- Reed, B.C., Brown, J.F., VanderZee, D., Loveland, T.R., Merchant, J.W. & Ohlen DO. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5(5), 703–714. <https://doi.org/10.2307/3235884>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Panorama Agroalimentario (2019). Primera edición, 2019 © Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. 218pp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Sifuentes Ibarra, E., Macías-Cervantes, J., Ruelas-Islas, J.D.R., Preciado-Rangel, P., Ojeda-Bustamante, W., Inzunza-Ibarra, M.A. y Samaniego-Gaxiola, J.A. (2015a). Mejoramiento del grado de uso del nitrógeno en maíz mediante técnicas parcelarias de riego por superficie. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1903. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i8.528>
- Sifuentes, I.E. y Macías, C.J. (2015b). “IRRIMODEL” Programación Integral y Gestión del Riego a Través de Internet. Manual de Usuario v. 2.0. INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Valle del Fuerte. Folleto Técnico No. 42. ISBN: 978-607-0547-9. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. 39 pp.
- Sifuentes-Ibarra, E., Samaniego-Gaxiola, J.A., Anaya-Salgado, A., Núñez-Moreno, J.H., Valdez-Gascón, B., Gutiérrez-Soto, R.G., Ruelas-Islas, J.D.R. y Macías-Cervantes, J. (2015c). Programación del riego en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1893. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i8.527>
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>
- Viña, A., Gitelson, A.A., Rundquist, D.C., Keydan, G., Leavitt, B. & Schepers, J. (2004). Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal*, 96(4), 1139–1147. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1139>
- Wei, Y., Tong, X., Chen, G., Liu, D. & Han, Z. (2019). Remote detection of large-area crop types: The role of plant phenology and topography. *Agriculture (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture9070150>
- Winz, I., Brierley, G. & Trowsdale, S. (2009). The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management. *Water Resour Manage.* (2009) 23:1301–1323. DOI 10.1007/s11269-008-9328-7

2. DÉFICIT HÍDRICO EN MAÍZ CONSIDERANDO FENOLOGÍA, EFECTO EN RENDIMIENTO Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

2.1. Resumen

La presencia de períodos de baja disponibilidad hídrica y las bajas eficiencias de riego han obligado a varios distritos de riego (DR) a implementar acciones como la reducción empírica de la superficie número de riegos de los cultivos de alta demanda, causando en muchos de los casos impactos negativos en rendimiento, al no manejarse en forma científica.. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del estrés hídrico considerando fenología, en los componentes de rendimiento y en el uso eficiente del agua del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). El trabajo se realizó en el DR075, durante el ciclo otoño-invierno (OI) 2012-2013, donde se evaluaron cuatro tratamientos (T) de déficit hídrico y un testigo (TES) diseñados a partir de la función FAO déficit hídrico-rendimiento. T1 recibió dos riegos de auxilio (RA) distribuidos en las fases V12 y R2, T2 recibió tres auxilios distribuidos en V9, R1 y R3, T3 recibió cuatro en V7, V12, R1 y R3-R4, T4 cinco en V5, V12, R1, R3 y R4. El TES recibió cuatro RA distribuidos como T3 pero aplicados en forma convencional. La evaluación se realizó con las variables: eficiencia de aplicación (EA), materia fresca (MF), materia seca (MS), rendimiento de grano (Ya), índice cosecha (HI) y productividad del agua (PA). El seguimiento de riegos y fenología se hizo con la plataforma informática IRRIMODEL© complementada con observaciones de campo; el monitoreo de la humedad del suelo se realizó con sensor portátil tipo TDR. Los resultados proporcionaron información científica para manejar el riego del cultivo de maíz considerando fenología, bajo condiciones normales y de disponibilidad hídrica restringida; en el primer escenario se debe evitar el quinto riego de auxilio y en el segundo utilizar el calendario de tres auxilios (T2) para obtener eficiencias EA igual o mayores a 64%.

Palabras clave: *Zea mays* L., disponibilidad hídrica, riego por gravedad, planeación del riego, rendimiento.

2.2. Introducción

La escasez de agua afecta al 52% de la población mundial localizada en las regiones áridas y semiáridas. La agricultura de riego se practica con mayor frecuencia en un ambiente restringido e incierto de recursos hídricos, debido a la intensificación de la variabilidad climática y a una mayor competencia hídrica por usuarios no agrícolas (Gheysari et al., 2017). El maíz es la tercera gramínea más importante en el mundo con 20% de la superficie cosechada cada año bajo riego y se localiza de manera principal en las zonas áridas y semiáridas donde existe alta variabilidad en los volúmenes de agua disponibles (FAO, 2011; Steduto et al., 2014).

México es uno de los principales productores de este grano en el mundo, pero su consumo interno es superior a su producción, por lo que sus importaciones superan los siete millones de toneladas anuales (SIAP, 2016). El estado de Sinaloa, en la región noroeste de México, es el principal productor de maíz bajo riego en el país al cosechar cada año más de 452000 ha en sus ocho distritos de riego (DR), con una producción de 5.29 millones de toneladas (SIAP, 2020); pero los análisis de señal de cambio climático para este estado indican una anomalía positiva de la temperatura de 1 a 2 ° C con respecto al periodo base 1961-1990 y una reducción de la precipitación del 20% (Castillo-Castillo et al., 2017; Lobato y Altamirano, 2017) que han impactado en la duración de los ciclos fenológicos y productividad de los cultivos, además de afectaciones cada vez más frecuentes de eventos climáticos extremos como ciclones, heladas y sequías (Ojeda et al., 2011; CONAGUA, 2018).

Otro de los grandes problemas de las zonas de riego de México, es la deficiente gestión del riego por gravedad ya que en la mayoría de los casos no se utilizan técnicas científicas para el diseño, programación, aplicación y evaluación resultando en eficiencias de riego globales del orden de 34.1% (Olmedo et al., 2017). Se estima que en los DR del norte de Sinaloa a nivel parcelario se aprovecha menos del 45% del agua aplicada, el resto se mueve fuera de la zona radical a través del drenaje superficial y percolación profunda (Sifuentes et al., 2015b). Ante esta problemática, se requiere de acciones para mejorar el aprovechamiento del agua en términos de productividad, ahorro y sustentabilidad, bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica (Ferreles & Soriano, 2006). Existen estrategias de riego que permiten reducir la frecuencia y cantidad del riego aplicado a los cultivos con mínimos efectos en los rendimientos convencionales si son validadas localmente, como la aplicación del riego deficitario en función del desarrollo fenológico (Mendoza et al., 2016).

Stewart et al. (1977) propusieron relaciones empíricas para predecir el efecto de la evapotranspiración en el rendimiento de los cultivos, utilizando un factor de respuesta K_y que representa la relación entre la producción y el uso del agua de un cultivo incluso para cada etapa fenológica, dichas relaciones fueron adoptadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para estimar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento potencial de los cultivos (Doorenbos & Kassam, 1979; Steduto et al, 2014). Estas relaciones pueden contribuir al ahorro de volúmenes de agua significativos con reducción mínima en el rendimiento de grano y materia seca cuando se aplican en forma apropiada, ya que se reducen los requerimientos de riego en las etapas menos sensibles al estrés hídrico.

La aplicación adecuada de la relación déficit hídrico-rendimiento permite estimar el efecto del estrés hídrico por fases fenológicas en el rendimiento de maíz y aplicarse en escenarios de disponibilidad hídrica normal y restringida con restricción del número de riegos en los distritos de riego de las zonas áridas y semiáridas de México. En esta vertiente, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del estrés hídrico aplicado en etapas fenológicas, que reduzcan de manera óptima la frecuencia y cantidad de riego aplicado, en los componentes del rendimiento del cultivo de maíz bajo riego por gravedad.

2.3. Materiales y métodos

2.3.1. Descripción de la zona de estudio

El estudio se estableció durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2012-2013, en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en la zona árida del norte del estado de Sinaloa, México, en las coordenadas $25^{\circ} 45' 53''$ N y $-108^{\circ} 48' 46''$ O a 12 msnm. El suelo es de textura arcillosa, con densidad aparente (D_a) de 1.15 g cm^{-3} y valores estimados de las constantes hídricas capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), saturación (SAT) y humedad aprovechable (HA) de 0.48, 0.33, 0.57 y $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

El suelo es moderadamente bajo en materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), con niveles satisfactorios de pH (7.05), conductividad eléctrica (CE) (0.96 dS m^{-1}), carbonatos totales (1.96 %) y sodio intercambiable (175 ppm). La precipitación anual acumulada promedio de la zona de estudio es de 350 mm, concentrándose el 70% de julio a septiembre, y de febrero a mayo la precipitación es insignificante.

Los valores anuales de la evapotranspiración de referencia acumulada (ET_o) varían de 1600 a 1700 mm; que excede a la precipitación acumulada anual por lo que se requiere el riego para asegurar rendimientos comerciales principalmente en el ciclo agrícola otoño-invierno (OI).

2.3.2. *Tratamientos y diseño experimental*

El diseño experimental fue en bloques al azar con cinco repeticiones, los tratamientos (T) fueron cuatro, más un testigo (TES). Los tratamientos se diseñaron utilizando la relación rendimiento-déficit hídrico aplicado en etapas fenológicas, reportada por Doorenbos & Kassam (1979) y Steduto et al. (2014), como se muestra en la ecuación (2.1).

$$\left(\frac{Y_x - Y_{EST}}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (2.1)$$

Donde, Y_x es el rendimiento máximo esperado en la zona de estudio y Y_{EST} es el rendimiento estimado; ET_x y ET_a son la evapotranspiración o lámina neta (Ln) máxima y actual, calculada como la acumulación de evapotranspiración del cultivo diaria (ET_c) hasta madurez fisiológica; K_y es un factor de proporcionalidad entre la pérdida de rendimiento relativo y la reducción relativa en evapotranspiración, que varía por fases fenológicas.

El valor de K_y utilizado para T1 fue 2.3 y 1.25 para el resto de los tratamientos; se consideraron los valores de $Y_x = 12 \text{ t ha}^{-1}$ y $ET_x = 52.3 \text{ cm}$ esperados en TES. El calendario de riegos aplicado en TES (T5) se basó en el paquete recomendado por el INIFAP (2017) y el manejo de los agricultores líderes de la zona de estudio.

El Cuadro 2.1 describe cada T donde se indica la fase fenológica con sus grados-día desarrollo acumulados (GDDA) y el grado de estrés hídrico planeado para cada riego, Ln , Ln relativa (RLn) con respecto a TES, lámina bruta (Lb) programada, Y_{EST} y rendimiento relativo estimado ($Y_{R_{EST}}$) con respecto a TES; los GDDA se calcularon con la metodología utilizada por Ojeda et al. (2006). Para cada tratamiento se consideró un riego de germinación de 23 cm (Lb) similar al aplicado en parcelas comerciales bajo un escenario de suelo seco cercano a PMP. Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica automatizada (EMA) instalada a 200 m del lote experimental.

Cuadro 2.1. Descripción de tratamientos para la evaluación de estrés hídrico en maíz basado en etapas fenológicas.

Tratamiento	Descripción	Ln (cm)	RLn (%)	Lb (cm)	Y _{EST} (t ha ⁻¹)	YR _{EST} (%)
T1	2 riegos de auxilio (RA): V12 (722 GDDA) y R2 (954 GDDA). Estrés fuerte en la etapa vegetativa (EV) y en maduración	43.1	82	61.1	7.2	60
T2	3 RA: V9 (606 GDDA), R1 (859 GDDA) y R3 (1167 GDDA). Estrés moderado a la mitad de EV y fuerte en maduración	49.6	95	79.0	11.2	94
T3	4 RA: V7 (514 GDDA), V12 (722 GDDA), R1, R3-R4 (1167-1256 GDDA). Estrés ligero al inicio del ciclo y estrés moderado en maduración.	52.3	100	82.8	12.0	100
T4	5 RA: V5 (389 GDDA), V12, R1, R3, R4. Estrés ligero al inicio y al final del ciclo	51.7	99	87.7	11.8	99
T5 (TES)	Igual que T3 pero con láminas brutas similares al manejo convencional	52.3	100	92.9	12.0	100

V5, V7, V9 y V12 representan la quinta, séptima, novena y doceava hoja verdadera; R1, R2, R3 y R4 indican las fases jiloteo o polinización, grano acuoso, grano lechoso y grano masoso respectivamente; Y_{EST} el rendimiento estimado, YR_{EST} el rendimiento relativo estimado.

Para el establecimiento del experimento se utilizó un terreno de 120 m de ancho por 100 m de largo (1.2 ha), cuya preparación para la siembra consistió en un subsoleo, barbecho, dos pasos de rastra, empareje y formación de surcos (separados a 80 cm). Una vez preparado el terreno se aplicó una fertilización de base con dosis de 450 kg ha⁻¹ de la mezcla física 30-10-12 de N-P-K, respectivamente. La siembra se realizó en seco el 12/12/2012 con sembradora de precisión marca Monosem después de aplicada la fertilización de base, utilizando la variedad comercial DK-3000 de ciclo intermedio (aproximadamente 1456 GDDA a madurez fisiológica) con una densidad aproximada de 100000 semillas ha⁻¹. Un riego de germinación se aplicó al lote experimental al

siguiente día de la siembra para uniformizar la humedad llevando el suelo a CC en la zona de raíces (100 cm). La germinación se presentó el 24/12/2012 de diciembre a los 12 días después de la siembra (DDS), la máxima cobertura del dosel ocurrió entre el 26 y el 31 de marzo del 2013 (104 a 109 DDS) y la senescencia se presentó del 03 al 10 de mayo (142 a 149 DDS) dependiendo del tratamiento. Una fertilización complementaria se aplicó a base de 100 kg ha⁻¹ de urea (46-00-00) en la fase fenológica V5.

2.3.3. Variables medidas

A cada tratamiento se le dio seguimiento fenológico de acuerdo con la metodología de Abendroth et al. (2011), apoyado con el programa IRRIMODEL© (Sifuentes y Macías, 2015a), complementado con observaciones de campo. En la etapa de madurez fisiológica, se midieron las variables materia fresca (MF), biomasa (B), índice de cosecha (HI) y rendimiento de grano (Ya), mediante muestreos en cinco sitios representativos en un área de 0.8 m² en cada repetición de cada tratamiento (1 m x 0.8 m). A cada muestra se le separó tallo, hoja, grano, totomoxtle y olote para obtener el peso fresco (PF) y seco (PS) de cada órgano, este último con deshidratación forzada usando un horno de secado a temperatura de 65 °C hasta peso constante. La B se calculó sumando los PS de cada órgano (kg ha⁻¹) y el HI dividiendo el peso seco del grano (PSG) entre B.

La evaluación del rendimiento del grano se realizó previo a la cosecha a los 191 DDS (1898 GDDA), mediante muestreos en sitios representativos localizados en los dos surcos centrales de cada parcela experimental de cada tratamiento en un área de 8 m² por sitio (5 m x 0.8 m x 2 surcos); en esta evaluación se midieron además las variables: 1) altura de planta (ALP), 2) plantas sin mazorca o jorras (PLJ), 3) mazorcas podridas (NMP), 4) plantas enfermas por Roya común (*Puccinia sorghi*) (PER) y 5) plantas enfermas por carbón común (*Ustilago maydis*) (PEC).

Las variables hidricas medidas fueron Ln, Lb, eficiencias de aplicación (EA) y productividad del agua (PA). Tanto en el riego de germinación como en los riegos de auxilio, se midió la humedad volumétrica del suelo antes del riego (HV_{act}) con sensor tipo TDR (Time Domain Reflectometry) calibrado localmente, para estimar Ln y llevar el suelo a CC aplicando la ecuación (2.2).

$$Ln = (CC - HV_{act}) \times Pr \quad (2.2)$$

Donde, CC y HV_{act} se expresan en cm³ cm⁻³ y Pr representa la profundidad del suelo (cm). La EA se estimó con la expresión: EA = (Ln / Lb) x 100 con Ln y Lb expresadas en cm. Lb se calculó con: Lb = (Q x t) / A, donde Q es el gasto de riego aplicado a la parcela (m³ s⁻¹), t es el tiempo de

riego (s) y A es la superficie regada (m²). PA se calculó dividiendo el rendimiento de grano (kg ha⁻¹) entre el volumen de agua aplicado (V) en los tratamientos (m³ ha⁻¹). Un análisis de diferencias relativas (Δx) se realizó para las variables Ya, Lb, EA y PA de cada tratamiento (T) con respecto a TES; la ecuación (2.3) se utilizó para realizar este análisis.

$$\Delta x = \frac{(T_n - T_{TES})}{T_{TES}} \quad (2.3)$$

Donde, T_n es el valor de la variable de interés del tratamiento n y T_{TES} es el valor obtenido de la misma variable en el testigo. Al final se realizó un análisis de varianza del rendimiento de grano (Ya) para determinar el nivel de significancia entre tratamientos, utilizando el paquete estadístico MINITAB para comparación de medias aplicando la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

2.4. Resultados y discusión

2.4.1. Déficit hídrico-rendimiento

El Cuadro 2.2 presenta una comparación del nivel de déficit hídrico (DH) calculado como el valor de $1 - (ETa/ETx)$ (valores altos indican niveles de estrés altos) (Doorenbos & Kassam, 1979; Steduto et al, 2014), en ocho intervalos de fases fenológicas en los cinco tratamientos. En cada intervalo se muestran también los valores de ETa y ETx; y en la última columna se presenta el rendimiento obtenido (Ya) en cada tratamiento. T1 recibió un estrés fuerte en el intervalo V5-V12, estrés moderado en floración (R1-R2) y estrés severo en maduración desde la fase R4 hasta R6 con valores de 0.47 a 0.80, con un Ya de 6.62 t ha⁻¹.

Cuadro 2.2. Variación de la evapotranspiración (ETa) (mm) y el déficit hídrico (DH) en ocho intervalos de fases fenológicas de maíz y su efecto en rendimiento (Ya), en cinco tratamientos de estrés basados en fenología, en el norte de Sinaloa, México.

Tratamiento		Intervalos de fases fenológicas								Ya (t ha ⁻¹)
		S-V5	V5-V12	V12-R1	R1-R2	R2-R3	R3-R4	R4-R5	R5-R6	
T1	ETa	47.4	89.5	74.9	56.8	108.9	32.5	14.8	6.0	6.62
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.34	0.05	0.18	-0.24	0.29	0.47	0.80	
T2	ETa	47.4	124.9	65.9	69.8	84.2	46.0	27.6	30.0	11.42
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.08	0.16	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	
T3	ETa	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	12.41
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	

Tratamiento	Intervalos de fases fenológicas									Ya (t ha ⁻¹)
	S-V5	V5-V12	V12-R1	R1-R2	R2-R3	R3-R4	R4-R5	R5-R6		
DH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
T4	ETa	47.4	127.6	78.6	69.8	84.2	46.0	30.0	33.5	
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	12.56
T5 (TES)	DH	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.00	-0.08	-0.11	
	ETa	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	11.87
DH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

S: siembra, V: hojas verdaderas, R1: jilote, R2: grano acuoso, R3: grano lechoso, R4: grano masoso. R5: grano dentado, R6: madurez, ETx: evapotranspiración máxima (mm)

T2 recibió un estrés moderado previo a la floración (V12-R1) y ligero en etapa vegetativa (V5-V12) y formación de grano (R2-R3), con un Ya de 11.42 t ha⁻¹. T4 recibió un estrés ligero entre las fases V5-V12 y R2-R3 observándose valores más altos de ETa que ETx en la etapa de maduración, Ya fue de 12.56 t ha⁻¹. Debido a que TES (T5) el tratamiento tomado como referencia, los valores se mantuvieron en ceros al igual que T3 ya que la distribución de riegos fue igual a T5. Destaca la similitud de rendimientos entre T2 y T5 (TES), lo cual demuestra la validez de la evaluación del concepto. El análisis de correlación entre Ya y Y_{EST} generó un coeficiente de determinación (R²) de 0.9841 y un RMSE de 0.4495 t ha⁻¹ (Figura 2.1).

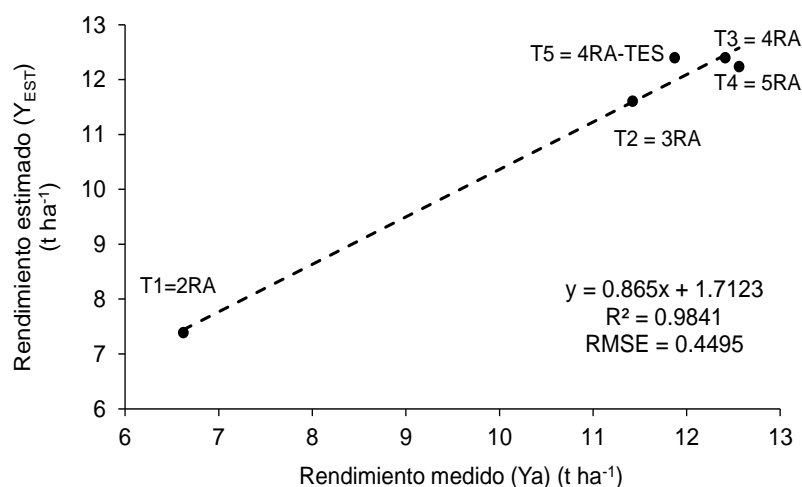


Figura 2.1. Comparación del rendimiento medido (Ya) y rendimiento estimado (Y_{EST}) en cinco tratamientos de estrés hídrico en maíz, en el norte de Sinaloa, México.
Variables hídricas

En el Cuadro 2.3 se presentan los valores obtenidos de Ln, Lb y EA en cada tratamiento. T1 recibió en el 1^{er} y 2^{do} riegos de auxilio una Lb de 16.7 y 16.9 cm respectivamente, con un valor acumulado de 50.6 cm lo cual coincide con los resultados reportados por Mendoza-Pérez et al. (2016) donde aplicaron una lámina total de 50 cm durante todo el ciclo agrícola en el cultivo de maíz de la misma variedad bajo riego por gravedad; la EA en este tratamiento fue de 61%. Las láminas aplicadas en T2 fueron 9.0, 8.3, 13.5 cm para el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} riego de auxilio respectivamente, con una lámina acumulado de 63.3 cm y una EA del 64 %. La lámina aplicada en este tratamiento coincide con los resultados reportados por Rivetti (2006) con un consumo de 57 cm en el cultivo de maíz durante todo el ciclo agrícola. T3 recibió una Lb de 11.5, 13.0, 9.0, 14.5 cm en el 1^{er}, 2^{do}, 3^{er} y 4^{to} riego de auxilio respectivamente, con una lámina acumulado de 65 cm y una EA de 66%. Ojeda et al. (2006) reportaron para la misma zona de estudio, valores de 42.2 cm de lámina neta y 73.6 cm de Lb en el cultivo de maíz bajo riego por gravedad aplicando cuatro riegos de auxilio y el riego de germinación, con una eficiencia de aplicación de 57%.

En T4 las láminas aplicadas fueron de 10.0, 12.9, 9.0, 16.5 y 10.3 cm en el 1^{er}, 2^{do}, 3^{er}, 4^{to}, y 5^{to} con una lámina acumulada de 75.6 cm con una EA de 67%. La lámina aplicada en este tratamiento coincide con los resultados obtenidos por Mendoza et al. (2016) con un consumo de 73.5 cm en el cultivo de maíz durante todo el ciclo agrícola. En T5 (TES) las láminas fueron de 15.6, 14.5, 14.4 y 14.3 cm en el 1^{er}, 2^{do}, 3^{er} y 4^{to} riego de auxilio, aplicado un total de 73.5 cm, que representa 7350 m³ ha⁻¹ de volumen total con una eficiencia de aplicación de 59%, Ojeda et al. (2006) reportaron valores similares de láminas de riego en el cultivo de maíz, encontrándose las mayores pérdidas por efecto de escurrimiento y percolación. En todos los casos la lámina acumulada incluye al riego de germinación, observándose valores menores a las programadas debido a que en el diseño de tratamientos la lámina del riego de germinación se calculó considerando un suelo cercano a PMP, lo cual no sucedió en la práctica ya que el monitoreo con TDR indicó presencia de humedad residual.

Cuadro 2.3. Lámina neta (Ln), Lámina bruta (Lb) y Eficiencias de aplicación (EA) en cinco tratamientos de estrés hídrico en maíz basado en fenología, en el norte de Sinaloa, México.

Tratamiento	Riego	Etapa	Días al riego	GDDA	Ln (cm)	Lb (cm)	EA (%)
T1	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V12	98	615	11.7	16.7	70
	2 ^{do} auxilio	R2	126	914	9.0	16.9	53
Total					30.7	50.6	60.7
T2	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V9	90	542	9.0	14.0	64
	2 ^{do} auxilio	R1	113	780	8.3	13.3	62
	3 ^{er} auxilio	R3	134	1005	13.5	19.0	71
Total					40.8	63.3	64.0
T3	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V-7	76	435	7.5	11.5	65
	2 ^{do} auxilio	V-12	99	626	8.6	13.0	66
	3 ^{er} auxilio	R1	113	780	6.3	9.0	70
	4 ^{to} auxilio	R3	134	1005	10.2	14.5	70
Total					42.6	65.0	66.0
T4	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V-5	62	364	6.5	10.0	65
	2 ^{do} auxilio	V-12	98	615	9.0	12.9	70
	3 ^{er} auxilio	R1	113	780	6.3	9.0	70
	4 ^{to} auxilio	R3	134	1005	11.7	16.5	71
	5 ^{to} auxilio	R4	148	1174	7.2	10.3	70
Total					50.7	75.7	67.5
T5 (TES)	Germinación	Siembra	0	0	5.5	14.7	37
	1 ^{er} auxilio	V-7	76	435	7.8	15.6	50
	2 ^{do} auxilio	V-12	99	626	9.0	14.5	62
	3 ^{er} auxilio	R1	113	780	9.8	14.4	68
	4 ^{to} auxilio	R3	134	1005	10.8	14.3	76
Total					42.9	73.5	58.6

La Figura 2.2 presenta la productividad del agua encontrada por tratamiento, T3 tuvo el valor más alto con 1.9 kg m⁻³ (equivalente a 28.78 kg mm⁻¹ ha⁻¹), seguida de T2, T4, T5 y T1 con 1.8, 1.7, 1.6 y 1.3 kg m⁻³ respectivamente. Los valores se encuentran dentro del rango de 24.9 a 29.1 kg mm⁻¹ ha⁻¹ reportados por Zhang et al. (2018) en un trabajo relacionado con el aprovechamiento del agua de lluvia en surcos.

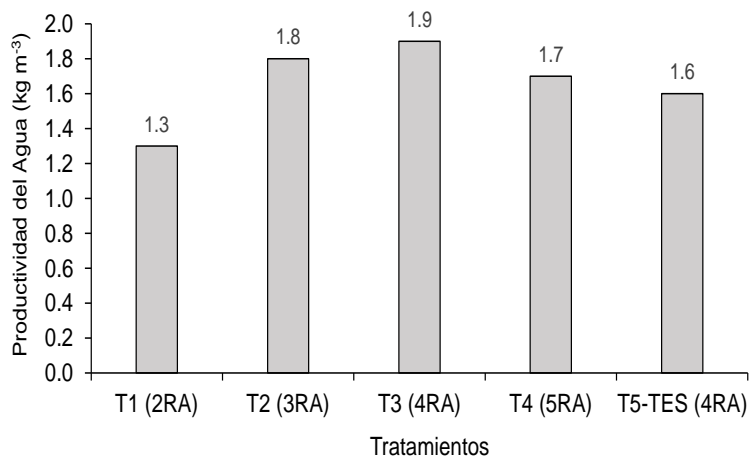


Figura 2.2. Productividad del agua en cinco tratamientos de estrés hídrico basados en fenología en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa, México.

Estos resultados reflejan una relación directa entre EA y rendimiento, y una relación inversa con el estrés hídrico, acentuándose más en T1 y T5 (TES). Este comportamiento permite afirmar que al incrementar el número de riegos sin mejorar la EA no necesariamente se mejora el rendimiento, como se presentó en T4 (cinco auxilios). T3 además de generar un rendimiento similar a T4, demostró la posibilidad de ahorrar $1070 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ respecto a T4. Aunque la PA de T2 fue ligeramente menor a T3, el ahorro de agua fue de $1240 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con respecto a T4 sin reducción considerable en rendimiento.

2.4.2. Relación humedad del suelo- rendimiento

El Cuadro 2.4 muestra el rendimiento de grano medido (Y_a) y la reducción de rendimiento (ΔY) asociado al déficit de humedad del suelo provocado en cada tratamiento. El rendimiento más bajo fue para T1 con 6.62 t ha^{-1} , lo cual representa una reducción del 44% con respecto a TES donde se obtuvo un rendimiento de 11.87 t ha^{-1} . En T2 el rendimiento fue de 11.42 t ha^{-1} lo cual representa una reducción de solo 3.79% con respecto a TES. Los rendimientos de T3 y T4 que son junto con TES los escenarios más comunes de manejo del riego en la zona, fueron similares con 12.41 y 12.56 t ha^{-1} , lo cual representan respectivamente un incremento de 4.55 y 5.81% con respecto a TES. Se encontraron diferencia estadística significativa de rendimiento de grano (Y_a) entre los tratamientos.

Cuadro 2.4. Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento del cultivo de maíz en cinco tratamientos de estrés en el norte de Sinaloa, México.

Tratamiento	Fase fenológica	HSAR (%)	HAC (%)	AHS (%)	Dr (días)	Ya (t ha ⁻¹)	ΔY (%)
T1	V12	37.0	11.0	73	98	6.62 c	-44.23
	R2	38.0	10.0	67	126		
T2	V9	37.5	10.5	70	90	11.42 b	-3.79
	R1	39.0	9.0	60	113		
	R3	40.0	8.0	53	134		
T3	V7	40.0	8.0	53	76	12.41 a	+4.55
	V12	41.0	7.0	47	98		
	R1	42.0	6.0	40	113		
	R3	42.0	6.0	40	134		
T4	V5	41.8	6.2	41	62	12.56 a	+5.81
	V12	41.9	6.1	41	98		
	R1	42.6	5.4	36	113		
	R3	42.8	5.2	35	134		
T5 (TES)	R4	43.0	5.0	33	148	11.87 ab	0.00
	V7	40	8	53	76		
	V12	41	7	47	98		
	R1	42	6	40	113		
	R3	42	6	40	134		

HSAR: humedad volumétrica del suelo antes del riego, HAC: humedad aprovechable consumida, AHS: abatimiento de humedad del suelo, Dr: días al riego, Ya: rendimiento medido, ΔY: variación de rendimiento con respecto al testigo. Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

La Figura 2.3 muestra la variación estimada del contenido volumétrico de humedad del suelo para los tratamientos excepto TES (debido a que el calendario de riegos fue igual a T3), así como los valores de humedad observados, encontrándose un RMSE de 2.86% entre ambas, lo cual soporta la validez de la metodología. La figura también indica la pertinencia de aprovechar el contenido de humedad del suelo en el riego inicial para disminuir la Lb, también sugiere considerar la humedad al finalizar el ciclo para adelantar la aplicación del último riego con Lb reducida y evitar terminar el ciclo (madurez) con altos contenidos de humedad, como se presentó en T4 y en menor grado en T3.

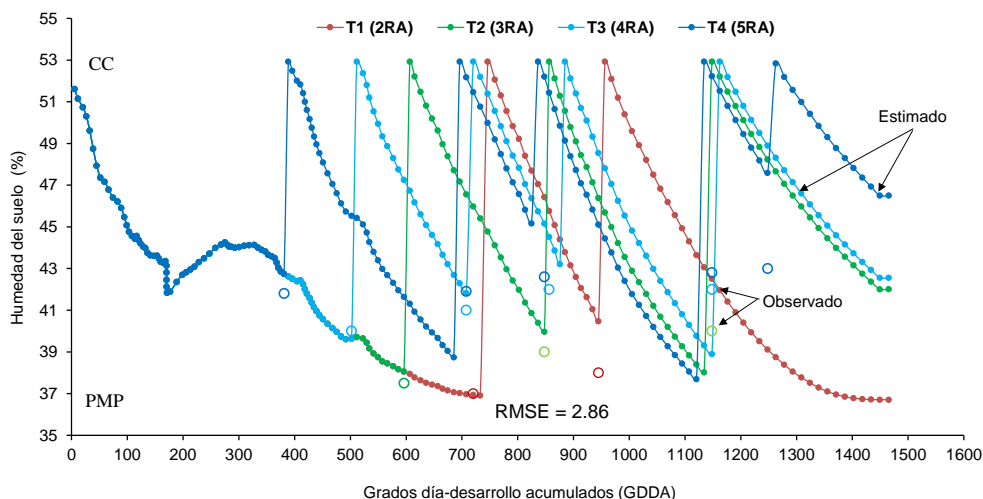


Figura 2.3. Variación de la humedad del suelo estimada y observada antes del riego, en cuatro tratamientos de estrés hídrico en maíz basado en fenología.

Respecto a las otras variables fisiológicas medidas junto con Ya previo a la cosecha, se encontró que el mayor efecto negativo provocado por el estrés hídrico fue para T1, reflejándose en una ALP de 170 cm (60 a 70 cm menor que el resto de los tratamientos) y un mayor número de PLJ (sin mazorca), NMP (mazorcas podridas) y PER (plantas enfermas por roya). T3 presentó valores similares a T4 y T5 y ningún tratamiento presentó daños por carbón (PEC).

2.4.3. Componentes de rendimiento

El tratamiento que presentó la mayor producción de MF y MS en todos los órganos fue T3 (Figura 2.4), lo cual confirma que riegos eficientes y científicamente programados, generan un ambiente favorable de humedad en el suelo para el desarrollo del cultivo, al reducirse el estrés por asfixia radicular (falta de O₂), que afecta directamente la producción de biomasa como se observó en T5 (TES). Jiménez et al., (2012) afirmaron que el estrés por inundación genera en la planta cambios que pueden ser irreversibles como disminución de la permeabilidad de las membranas, peroxidación lipídica (reducción oxidativa de lípidos), degradación de proteínas clorofílicas, disminución de la expansión foliar y cierre estomático causando disminución del CO₂ en los espacios intercelulares y disminución en la tasa fotosintética.

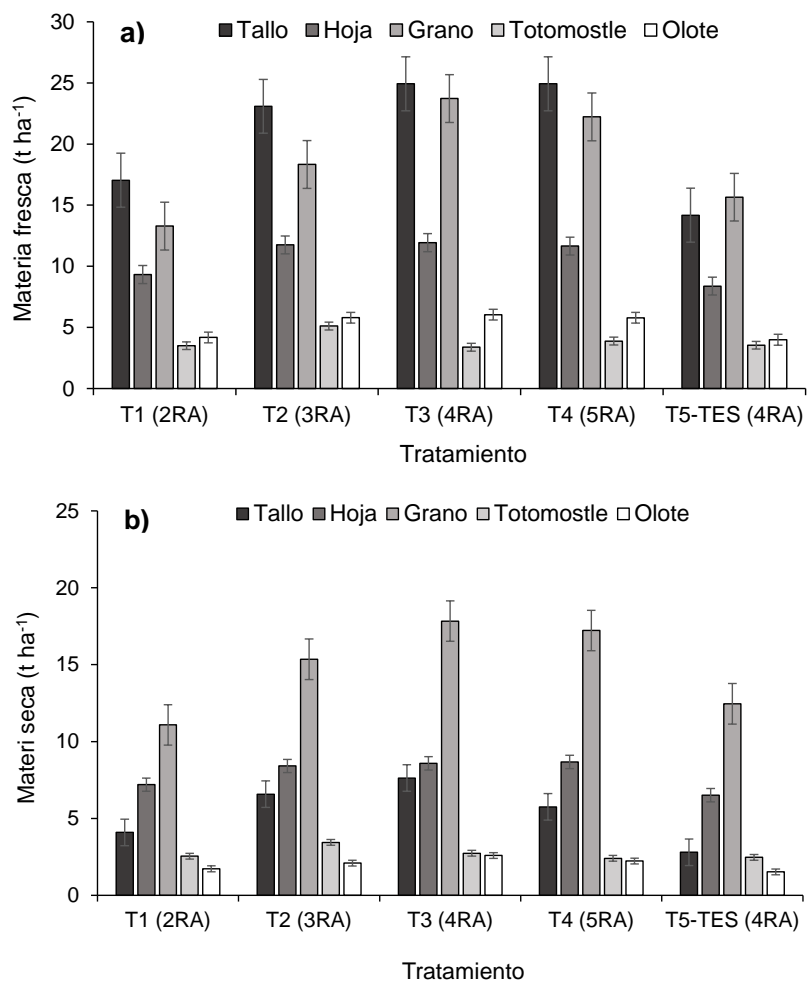


Figura 2.4. Producción de materia fresca (a) y materia seca (b) de cinco partes de la planta de maíz, sometidos a cinco tratamientos de estrés hídrico basados en fenología.

El HI es un indicador de la eficiencia del genotipo para transformar los asimilados en grano, con el paso de los años este índice se ha incrementado como resultado del mejoramiento genético y del uso de prácticas agronómicas mejoradas (Woli et al., 2016). El tratamiento con el valor más bajo de HI fue T1 con 42%, como consecuencia de una menor producción de MS en grano, mientras que el mayor fue T4 con 50% (Figura 2.5). Estos valores son similares a los reportados por Abendroth et al. (2011), quienes determinaron que los híbridos de maíz comerciales en la faja maicera de EUA presentan HI promedio óptimos de 50%. Estas variables resultan de gran utilidad en la calibración y validación de modelos de simulación de crecimiento de cultivos, como el modelo AquaCrop (Vanuytrecht et al., 2014).

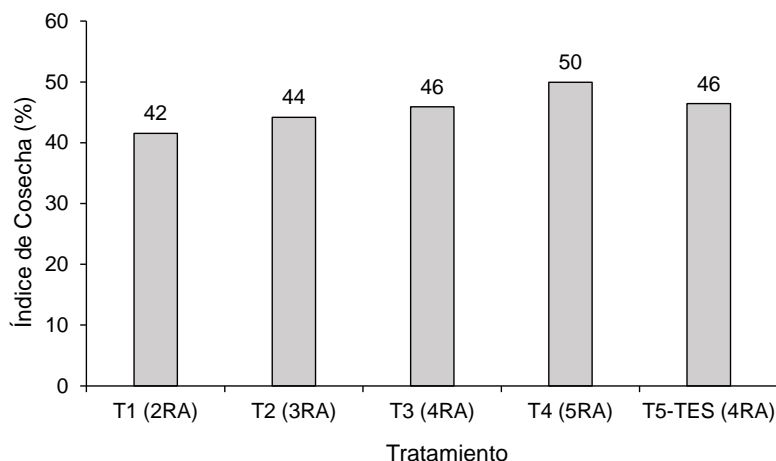


Figura 2.5. Índice de cosecha en cinco tratamientos de estrés hídrico basado en etapas fenológicas en el cultivo de maíz, en el norte de Sinaloa, México

Diferencias relativas (Δx)

El Cuadro 2.5 presenta las diferencias relativas entre tratamientos de las variables Y, Lb, EA y PA; se observa que al reducir Lb con respecto a TES disminuye el rendimiento, pero al ser mayor Lb que TES, el incremento en rendimiento no es significativo. Este comportamiento también se observa con las variables EA y PA y puede ser un indicador para generar estrategias de manejo del déficit hídrico de los cultivos para las condiciones de manejo agronómico y genotipos actuales del norte de Sinaloa, sin afectar significativamente los rendimientos. Segovia-Cardozo et al. (2019) al evaluar cuatro distritos de riego en España durante cuatro años, encontraron valores del indicador ARIS (Annual Relative Irrigations Supply) mayores a la unidad que representa un suministro mayor al requerimiento bruto (Lb) y no se reportó efecto en rendimiento.

Cuadro 2.5. Diferencias relativas (%) con respecto al testigo de las variables rendimiento (Ya), lámina bruta (Lb), eficiencia de aplicación (EA) y productividad del agua (PA), en cuatro tratamientos de estrés hídrico basado en etapas fenológicas en maíz, en el norte de Sinaloa, México.

Tratamiento	ΔY_a	ΔL_b	ΔEA	ΔPA
T1	-44.23	-31.16	3.39	-18.74
T2	-3.79	-13.88	8.47	9.63
T3	+4.55	-11.56	11.86	21.01
T4	+5.81	2.86	13.56	3.19

2.5. Conclusiones

Los resultados obtenidos proporcionan información científica para el manejo del riego del cultivo de maíz bajo estrés hídrico aplicado en función de la fenología del cultivo, muy útil en escenarios de baja disponibilidad hídrica. Se encontró una relación directa de la eficiencia de aplicación (EA) con los componentes del rendimiento y una relación inversa con el estrés hídrico, lo cual debe considerarse al manejar los dos escenarios de disponibilidad hídrica, es decir, la distribución de riegos basada en fenología con EA igual o mayor a 64%, mejora el rendimiento y la productividad del agua. Para las condiciones locales y condiciones normales de disponibilidad hídrica se debe evitar la aplicación del quinto riego de auxilio en los suelos predominantes de la zona, ya que no existe incremento significativo en rendimiento y el sobre-riego puede ser de al menos 1070 m³ ha⁻¹. Bajo condiciones de disponibilidad hídrica restringida, la mejor opción es el esquema de tres riegos de auxilio (T2) con EA mayores a 60%, lo cual puede generar ahorros de agua de 1240 m³ ha⁻¹ sin reducción significativa en rendimiento. En todos los casos se debe aprovechar la humedad inicial del suelo al momento de la siembra y evitar terminar el ciclo del cultivo con alto contenido de humedad del suelo ya que reduce en forma importante las láminas brutas y en consecuencia se mejora la eficiencia y productividad del agua.

2.6. Referencias

- Abendroth, L.J., Elmore, R.W., Boyer, M.J. & Marlay, S.K. (2011). Corn Growth and Development. PMR 1009. Iowa State University Extension. Ames, Iowa, EUA. 49 p.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L.A., Valdés, J.B., Arteaga-Ramírez, R. y Vázquez-Peña, M.A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tec. y Ciencias del Agua, IMTA*, 8 (1): 35-52. ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. Irrig. and Drainage Paper no. 33. FAO, Rome.
- Fereres, E. & Soriano, M.A. (2006). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Exp. Botany. Integrated Approaches to Sustain and Improve Plant Production Under Drought Stress, Special Issue. pp: 1-13.* doi:10.1093/jxb/erl165.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture, managing systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. 285p.
- Gheysari, M., Sadeghi, S.H., Loescher, H.W., Amiri, S., Zareian, M.J., Majidi, M.M, Asgarinia, P. & Payero, J.O. (2017). Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agric. Water Manage.* 182: 126–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.014>

- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2017). Agenda Técnica Agrícola Sinaloa. © INIFAP. Ciudad de México, México. 209 p. Recuperado de: (https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/)
- Jiménez, S., J.C., Moreno, F.L.P. y Magnitskiy, S. (2012). Respuesta a las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Rev. Colombiana de Ciencias Hortícolas* 6: 96-109. DOI: 10.17584/rcch.2012v6i1.1287
- Lobato-Sánchez, R. y Altamirano-Del Carmen, M.A. (2017). Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México. *Tecnología y Ciencias del Agua. IMTA*. 8 (6): 101-116, ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Mendoza, P.C., Sifuentes, I.E., Ojeda, B.W. & Macías, C.J. (2016). Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 8(1): 29-40. doi: 10.5154/r.inagbi.2016.03.001.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., y Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en Maíz en el Norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13–25.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E., Íñiguez, C.M. y Montero, M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimiento hídrico de los cultivos. *Agrociencia*. 45:1-11.
- Olmedo-Vázquez, V.M., Minjares-Lugo, J.L., Camacho-Poyato, E., Hernández-Hernández, M.L. y Rodríguez-Díaz, J.A. (2017). Uso del análisis envolvente de datos (DEA) para evaluar la eficiencia de riego en los módulos del distrito de riego no. 041, río yaqui (sonora, México). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(2), 127–148.
- Paredes, P, J. de Melo-Abreu, P., Alves, I. & Pereira, L.S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*. 144:81-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.002>
- Rivetti, A.R. (2006). Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Rio Cuarto, Córdoba, Argentina, I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev. FCA UNCuyo*. 38(2): 25-36. Retrieved from <http://bdigital.uncu.edu.ar/1309>.
- Segovia, C.D.A., Rodríguez, S.L., & Zubeizu, S. (2019). Water use efficiency of corn among the irrigation districts across the Duero river basin (Spain): Estimation of local crop coefficients by satellite images. *Agric. Water Manage.* 212: 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.042>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2016). Información estadística de la producción agropecuaria y pesquera mexicana. México: Author. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx/>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). Información estadística de la producción agrícola mexicana. <https://www.gob.mx/siap/>. Fecha de consulta: Junio 2020
- Sifuentes, I. E. y Macías, C.J. (2015a). “IRRIMODEL” Programación integral y gestión del riego a través de internet, manual del usuario, versión 2.0. INIFAP-CIRNO-CEVAF. Publicación especial No. 14, noviembre de 2015, ISBN 978-607-425-911-7. Juan José Ríos, Sinaloa, México. 36p.

- Sifuentes, I. E., Macías C.J., Ruelas, I.J.R., Preciado, R.P., Ojeda, B.W. e Inzunza, I.M.A. (2015b). Mejoramiento del grado de uso del nitrógeno en maíz, mediante técnicas parcelarias de riego por superficie. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(8):1903-1914.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. & Fereres, E.. (2014). AquaCrop: conceptos, fundamento y funcionamiento. Capítulo 3: Respuesta del rendimiento de cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. En: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO 66. ISSN 0254-5284. Roma, Italia. Pp17-53
- Stewart, J.I., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Danielson, R.E., Franklin, W.T., Hanks, R.J., Riley, J.P. & Jackson, E.B. (1977). Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Utah Water Lab. PRWG 151-1. Logan, Utah. 191p.
- Vanuytrecht, E.D., Raes, P., Steduto, T., Hsiao, C., Fereres, E., Heng, L.K., García, V.M. & Mejias, M.P. (2014). AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. *Environm. Modelling & Software.* 62: 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Woli, K.P., Boyer, M.J., Elmore, R.W., Sawyer, J.E., Abendroth, L.J. & Barker, D.W. (2016). Corn era hybrid response to nitrogen fertilization. *Agron. J.* 108 (2): 495-508.
- Zhanga, Y., Ma, Q., Liu, D., Suna, L., Ren, X., Ali, S., Zhang, P. & Jia, Z. (2018). Effects of different fertilizer strategies on soil water utilization and maize yield in the ridge and furrow rainfall harvesting system in semiarid regions of China. *Agric. Water Manage.* 208: 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.032>

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA EL CULTIVO DE MAÍZ BAJO RIEGO DEFICITARIO, EN EL NOROESTE DE MÉXICO

3.1. Resumen

La intensificación de la variabilidad climática observada en las últimas tres décadas en las zonas de riego de México, ha generado periodos prolongados de baja disponibilidad hídrica que ponen en riesgo la estabilidad económica y social de estas regiones dependientes de la agricultura. Los modelos de simulación biológica son una herramienta tecnológica para optimizar prácticas agrícolas, analizando el comportamiento productivo de los sistemas agrícolas bajo diferentes escenarios ambientales, como el modelo AquaCrop que por su precisión y practicidad es uno de los más utilizados en el mundo. El objetivo del trabajo fue calibrar y validar este modelo para la simulación de la productividad del maíz bajo riego deficitario con el tiempo expresado en grados-día desarrollo (GDD). El trabajo se desarrolló durante los ciclos otoño-invierno (OI) 2017/2018 y 2018/2019, en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF)-INIFAP al norte del estado de Sinaloa, en un lote de 2.5 ha bajo riego por goteo, donde se evaluó el efecto de cuatro niveles de suministro de agua ($R1 = 100$, $R2 = 80$, $R3 = 60$ y $R4 = 40\%$), calculados respecto a la evapotranspiración máxima (ET_x), y tres niveles de nitrógeno ($N1 = 100$, $N2 = 200$ y $N3 = 400$ unidades ha^{-1}), en la productividad de tres híbridos comerciales de maíz (H1, H2 y H3). Se utilizó un diseño experimental en parcelas divididas, donde las parcelas grandes fueron los niveles R. Se determinaron los parámetros conservativos: cobertura del dosel (CCi), humedad del suelo (HS), requerimientos de riego (RR), rendimiento (Ya) y biomasa (B), así como algunos parámetros no conservativos determinados con AquaCrop. La calibración y validación mostraron alto nivel de precisión, en rendimiento se obtuvo una R^2_{NS} de 0.953 y una CRM de -0.061, en CCi el valor de R^2_{NS} fue de 0.87 y de CRM de -0.082 lo cual indica una ligera subestimación del modelo. AquaCrop quedó preparado para su aplicación y generalización en el norte de Sinaloa y en otras zonas de riego del noroeste de México.

Palabras clave: *Zea Mays* L., disponibilidad hídrica, distritos de riego, adaptación

3.2. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es una fuente alimenticia tanto humana como animal por su alta producción de biomasa y alto contenido de almidones, además de contar con gran variedad de usos industriales como la producción de bioetanol. Esta gramínea es de los tres cultivos más importantes del mundo, con más de 187 millones de hectáreas cultivadas anualmente. La tendencia en la demanda del cultivo de maíz en las últimas tres décadas va en aumento y está asociada a la mejora genética continua para una diversidad de ambientes tanto bajo condiciones de riego como de temporal, sin embargo, esta tendencia puede modificarse sino se responde con una adaptación planificada al cambio climático de los sistemas agrícolas (Atlin et al., 2017).

México es un gran productor de este grano, su producción promedio de los últimos 10 años es superior a los 23 millones de toneladas anuales, con un déficit superior a los 10 millones que importa principalmente de EUA. El estado de Sinaloa, localizado al noroeste de México, es el principal productor de maíz bajo riego produciendo de 5 a 7 millones de toneladas anualmente aportando la cuarta parte del consumo anual (SIAP, 2019). Sin embargo, la producción agrícola de este estado enfrenta graves problemas como: incremento en los costos de producción, incremento del riesgo por factores climatológicos, alta variabilidad en los volúmenes disponibles para riego, disminución de los subsidios del estado, uso intensivo de insumos, bajas eficiencias del riego predominante (gravedad) y monocultivo del maíz.

Pérez (2012) reportó que los eventos climatológicos severos como heladas, vientos fuertes, ondas de calor e inundaciones han incrementado su frecuencia, lo cual demanda la necesidad de incrementar la resiliencia de los sistemas agrícolas, para enfrentar los problemas actuales que pueden agravarse con la intensificación del cambio climático. Para el norte de Sinaloa se documentó una anomalía positiva de 1 a 2 °C en la temperatura media anual en el periodo reciente con respecto al periodo base 1961-1990 (Lobato-Sánchez & Altamirano-Del-Carmen, 2017), lo cual está afectando la duración de los ciclos fenológicos y el rendimiento de los cultivos, induciendo a los productores a aplicar acciones de adaptación autónoma, que pueden ser inadecuadas sino tienen soporte científico (Ojeda-Bustamante et al., 2014).

La planificación e implantación de acciones de adaptación como el manejo científico del riego deficitario, ante estos escenarios son un reto a mediano y largo plazo (Sifuentes-Ibarra et al., 2020) en cultivos sensible al estrés hídrico como maíz especialmente al finalizar la etapa vegetativa y durante las etapas de floración y llenado de grano (Stewart et al., 1977).

En consecuencia, mejorar el manejo del riego bajo condiciones de sequía y cambio climático requiere conocer la respuesta del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico y térmico. El uso de modelos de simulación a nivel mundial es una práctica común para optimizar las prácticas agrícolas, analizando el comportamiento productivo de sistemas agrícolas y su interacción con los factores de la producción como clima, suelo, agua, nutrición y manejo; dentro de los modelos que se han aplicado al cultivo de maíz en las últimas dos décadas se encuentran: DASSAT-CERES-Maize, APSIM-Maize, EPIC, STICS (Paredes et al., 2014).

Un modelo especializado en ingeniería de riego para cultivos herbáceos es AquaCrop (FAO) que utiliza una serie de parámetros experimentales verificados en diversas regiones del mundo para simular la respuesta del rendimiento del maíz al estrés hídrico bajo diferentes condiciones climatológicas (incluyendo cambio climático) y de manejo del riego. Este modelo tiene la ventaja de usar un número reducido de parámetros sin perder su precisión y manejar el tiempo en días calendario (DDS) o grados día-desarrollo (GDD), y puede aplicarse a cualquier región una vez que ha sido calibrado y validado localmente (Steduto et al., 2012). Aunque la mayoría de los casos de estudio con AquaCrop en maíz manejan el tiempo en DDS, es conveniente calibrarlo con GDD para generalizar su uso en condiciones diferentes a las experimentales.

Una vez que AquaCrop se calibra y valida es una herramienta precisa de bajo costo para analizar acciones de adaptación a los nuevos escenarios agrícolas, pero se requiere de trabajos experimentales controlados a nivel local bajo condiciones de riego deficitario. En México se ha tratado de estudiar la respuesta del maíz bajo condiciones de riego con AquaCrop, sin embargo, su generalización es restringida debido a la falta de información experimental para su parametrización, calibración y validación, que reproduzcan las variables observadas de humedad del suelo (HV_{act}), requerimientos de riego (ET_c), rendimiento (Y_a), biomasa (B), índice de cosecha (HI) y cobertura del dosel del cultivo (CCI), con alto nivel de precisión.

Los estudios para las variedades, fechas de siembra y condiciones ambientales en México son escasos y asumen en su mayoría parámetros de literatura que expresan el tiempo en DDS y los experimentos no se establecieron con riego deficitario controlado (Flores-Gallardo et al., 2013). La necesidad de contar con parámetros AquaCrop precisos basados en GDD, para las variedades y manejo actuales en la región más importante de riego productora de maíz en México, motivó el desarrollo del presente estudio bajo los siguientes objetivos:

Calibrar, validar y analizar el desempeño del modelo AquaCrop en la simulación del efecto del déficit del hídrico en la productividad del maíz, usando datos observados de, HV_{act} , ET_c , Ya , B , HI y CCi con el tiempo expresado en GDD para generalizar su aplicación en el norte de Sinaloa y en otras zonas de riego del noroeste de México.

3.2.1. El modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop a diferencia de otros modelos separa la ET en transpiración del cultivo (Tr) y evaporación del suelo (E), cuenta con un modelo de crecimiento y senescencia de dosel simple como la base para la estimación de Tr y su separación de E trata el rendimiento final en función de la B y el HI , segrega los efectos del estrés hídrico en crecimiento del dosel, senescencia del dosel, Tr y HI . La separación de ET en Tr y E evita la confusión del uso no productivo de consumo de agua, lo cual es importante especialmente en terrenos que no se cubren en su totalidad. Este enfoque condujo a la generación de la ecuación conceptual como base para estimar el crecimiento de los cultivos (ecuación 3.1).

$$B = WP \times \sum Tr \quad (3.1)$$

Donde WP es la productividad del agua (biomasa por unidad de transpiración acumulada) que tiende a ser constante durante una condición climática dada convirtiéndose en un parámetro conservativo (Steduto et al., 2012). Otra mejora de AquaCrop es la escala de tiempo utilizada, la ecuación anterior genera valores diarios, un período más cercano a la escala de tiempo de las respuestas de los cultivos al déficit de agua (Acevedo et al., 1971). Lo anterior es una mejora al usado por Doorembos & Kassam (1979) en el que se estimaba WP por ciclo o por fase fenológica. Como la mayoría de los modelos mecanicistas, AquaCrop integra en forma continua la relación suelo-cultivo-atmósfera considerando el suelo a través de su balance hídrico, la planta a través de los procesos de crecimiento, desarrollo y rendimiento, y la atmósfera con su régimen térmico, lluvia, demanda evaporativa y concentración de CO_2 . También considera niveles de fertilidad del suelo a medida que afecta el desarrollo del cultivo, productividad del agua y ajustes del cultivo a estreses hídricos y térmicos. La planta y sus interacciones con el suelo, el estado del agua y la demanda evaporativa de la atmósfera son aspectos que distinguen a AquaCrop de otros modelos, con sus efectos de estrés en cuatro variables: 1) CCi , 2) apertura estomática y transpiración, 3) senescencia del dosel y 4) HI . (Figura 3.1).

experimental en parcelas divididas. Los niveles R fueron las parcelas grandes y los otros dos factores las parcelas chicas, como se describe en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Descripción de tratamientos

Factor	Nombre	Clave	Descripción
A	Déficit hídrico	R	Cuatro niveles de déficit hídrico con respecto a la evapotranspiración máxima del cultivo (ETx) (%). R1 = 100, R2 = 80, R3 = 60 y R4 = 40. 100% representa reponer el total de ETx.
B	Híbridos comerciales	H	Tres híbridos comerciales de reciente incorporación al mercado
C	Niveles de nitrógeno	N	Tres niveles de nitrógeno (unidades ha ⁻¹). N1 = 100, N2 = 200 y N3 = 400

El lote experimental se dividió en cuatro secciones de 26 m en el primer ciclo dejando una calle de un metro de ancho en cada sección para tener cuatro repeticiones y un total de 144 parcelas experimentales de 166.4 m² (26 m x 8 surcos x 0.8 m) (Figura 3.2). En el segundo ciclo se manejaron tres secciones de 35 m (tres repeticiones) divididas por una calle de iguales características que en el primero, y tener 108 parcelas experimentales de 224 m² (35 m x 8 surcos x 0.8 m).

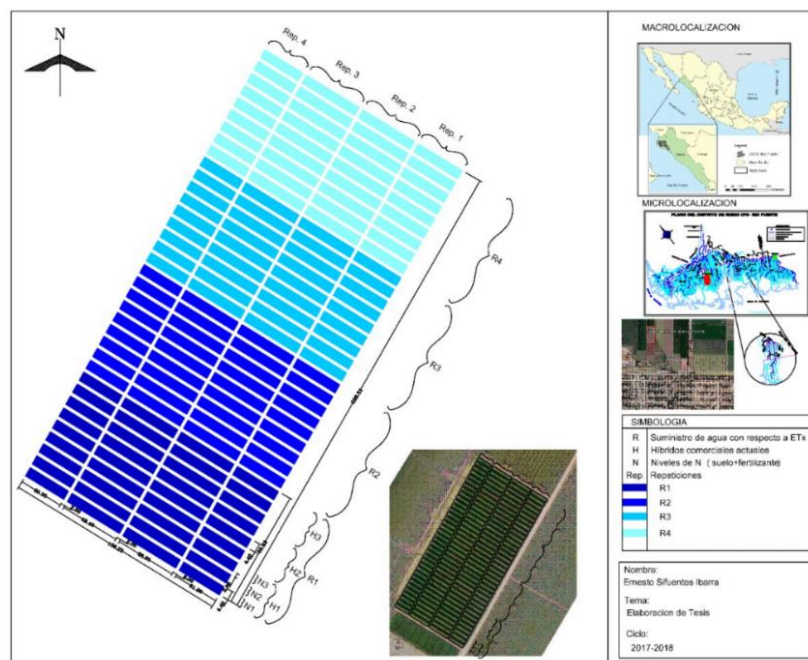


Figura 3.2. Distribución de tratamientos en lote experimental de maíz OI 2017/2018 para la parametrización del modelo AquaCrop,

La preparación del lote experimental en los dos ciclos consistió de un subsoleo, barbecho, dos pasos de rastra, empareje y marcado o surcado (80 cm). Un análisis físico-químico de dos muestras compuestas de suelo se realizó después de la preparación del terreno, para determinar textura, aporte nutrimental y descartar problemas de salinidad. En los dos ciclos se aplicó un riego de germinación por gravedad para llevar el suelo a capacidad de campo (CC) en la zona de raíces (100 cm). Una fertilización de base se realizó en cada ciclo, aplicando en el primero 300 kg ha⁻¹ de triple-17 (17-17-17 NPK) y en el segundo el fertilizante Actyva (21-7-14 NPK) con dosis de 300 kg ha⁻¹.

La siembra se realizó después de la fertilización de base con sembradora de precisión Monosem calibrada para una densidad de 100000 semillas ha⁻¹ a una profundidad de 7 cm; la fecha de siembra del primer ciclo fue el 20/12/2017 y para el segundo el 03/12/2018. Los riegos de auxilio y nitrógeno complementarios se aplicaron con un sistema de riego por goteo adaptado a los tratamientos colocando una línea regante por surco, con goteros separados a 30 cm y flujo de 1.1 L h⁻¹ (Figura 3.3). El fertilizante líquido UAN-32 (32-0-0 NPK) se utilizó como fuente de nitrógeno complementario en los dos ciclos.



Figura 3.3. Lote experimental de maíz bajo riego por goteo para la determinación de parámetros no conservativos de AquaCrop.

3.3.3. Información requerida

El modelo AquaCrop requiere de información relacionada con clima, cultivo, suelo, riegos, manejo y condiciones iniciales, los cuales deben ser introducidos al Software en forma ordenada para generar archivos de trabajo identificados con nombre y extensión específicos.

3.3.3.1. Clima

El modelo requiere datos diarios de temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) y mínima ($T_{m\acute{i}n}$) expresados en °C, precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ET_o) expresados en mm, y concentración de CO₂ en ppm. Los datos a excepción de los valores de CO₂ fueron adquiridos de la EMA del CEVAF ubicada en el área experimental y que forma parte de la red nacional del INIFAP (<https://clima.inifap.gob.mx>). Los valores de CO₂ fueron predeterminados por el modelo los cuales se adquirieron del Observatorio de Mauna Loa en Hawaii desde 1902. El cálculo de la ET_o se realizó con el método Penman-Monteith modificado. La Figura 3.4 muestra los datos correspondientes a los ciclos experimentales.

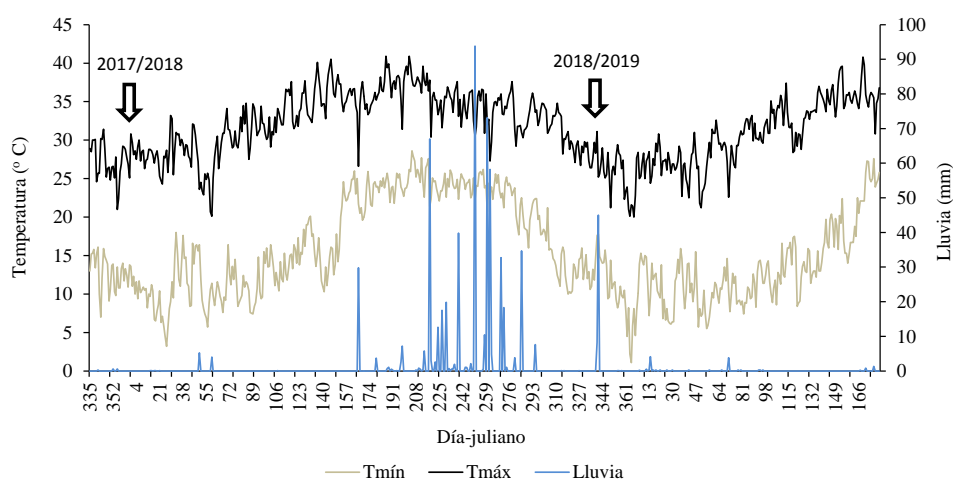


Figura 3.4. Temperatura y lluvia registradas durante los ciclos de calibración OI 2017/2018 y 2018/2019 del modelo AquaCrop, en el norte de Sinaloa.

3.3.3.2. Cultivo

El modelo requiere tanto parámetros conservativos como no conservativos, los primeros no cambian una vez que se determinan mientras que los segundos pueden cambiar si el material genético y el manejo del cultivo cambian en el proceso de experimentación. Los principales parámetros conservativos son: 1) temperatura mínima ($T_{u_{m\acute{i}n}}$) y máxima ($T_{u_{m\acute{a}x}}$) de desarrollo del cultivo, 2) cobertura inicial del dosel (CC_o), crecimiento máximo del dosel (CC_x), coeficiente de transpiración máxima del cultivo ($K_{cb, x}$), productividad del agua normalizada (WP^*), índice de cosecha de referencia (HI), declinación del dosel en senescencia, CGC y GDC. Entre los parámetros no conservativos están: 1) método de riego, 2) densidad de plantas, 3) desarrollo fenológico y 4) máxima profundidad de raíz.

Debido a que la información del desarrollo fenológico de los cultivos es difícil obtenerla a partir de la compañía de semillas o localmente no ha sido determinada para algún genotipo en particular, se deben generar experimentalmente. Hsiao et al., (2009) consideraron la madurez fisiológica cuando CCI se acerca a cero derivando este valor del índice de área foliar (LAI) y definieron el inicio de la senescencia cuando CCI correspondía a un valor de LAI igual o menor a 4.0. El Cuadro 3.2 muestra los valores reportados por algunos autores para estos parámetros.

Cuadro 3.2. Parámetros conservativos y no conservativos reportados para la calibración de AquaCrop en maíz

Tu (° C)	CCo (%, cm ⁻²)	Parámetros conservativos							Parámetros no conservativos				Referencia
		CGC (% gdd ⁻¹ , % día ⁻¹)	CDC (% gdd ⁻¹ , % día ⁻¹)	CCx (%)	DCCx (%)	Kcb,x	WP* (g m ⁻²)	HI (%)	SR	Dp (plantas ha ⁻¹)	GDDA (sn, mf)	Pr _{máx} (m)	
8, 30	nr, 6.5	1.30, nr	1.06, nr	Nr	0.3	1.03	33.7	48	A	80000	nr, 1510 a 1840	nr	Heng <i>et al.</i> (2009)
8, 30	nr, 4.1	1.49, nr	0.35, nr	96	nr	1.18	33.7	49	A	82000 a 90000	nr	nr	Paredes <i>et al.</i> (2014)
8, 35*	nr, 6.5	nr, 19.6	nr, 12.5	60	nr	1.05	31.7	nr	G	55556	nr	0.60	Oiganji <i>et al.</i> (2016)
9, 30*	0.43, nr	nr, 12.8	nr, 6.5	90	0.3	1.2	31	56	S	66000	nr	1.20	Hamid <i>et al.</i> (2015)
8, 30	0.50, nr	nr, 13.8	1.08, nr	90	0.3	1.1	34	50	G	100000	990, 1290	0.70	Giménez (2019)
8, 30	0.42, 6	nr, 13.6	nr, 16.2	94	0.3	1.02	33.7	52	S	nr	nr, 1469	1.00	Greaves, G.E. and Y.M. Wang (2016)
8, 30*	nr, 6.5	nr, 26.5	nr, 11.7	90	nr	nr	33.7	48	G	66000	nr	0.65	Abdalhi <i>et al.</i> (2019)
8, 30	nr. 6.5	1.3, nr	1.06, nr	nr	0.3	1.03	33.7	48	A, S	69800 a 11000	nr	2.60 a 2.80	Hsiao <i>et al.</i> (2019)

Tu: temperaturas de desarrollo del cultivo basal y máxima, CCo: cobertura del dosel al 90% de emergencia, CGC: coeficiente de crecimiento del dosel, CDC: coeficiente de declinación del dosel, CCx: cobertura máxima del dosel, DCCx: declinación de CCo después de senescencia, Kcb,x: coeficiente de transpiración máxima de cultivo, WP*: productividad del agua normalizada, HI: índice de cosecha de referencia, SR: sistema de riego, A: aspersión, G: goteo, S: gravedad, Dp: densidad de plantas, GDDA: grados-día desarrollo acumulados a senescencia (sn) y madurez fisiológica (mf), Pr_{máx}: profundidad efectiva máxima de la raíz.

3.3.3.3. Suelo

Los datos de suelo se refieren a las características físico-químicas e hidráulicas del suelo del lote experimental como textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), saturación (SAT) y conductividad eléctrica (CE). En el presente estudio se realizó un análisis de los estratos 0-30 y 30-60 cm (zona de máxima actividad radical) en los dos ciclos agrícolas, cuyos resultados se muestran en el Apéndice B; las constantes CC, PMP, SAT y Ks se estimaron con la metodología reportada por Rendón et al. (2012) verificando CC en forma gravimétrica. En el modelo se consideraron un suelo profundo y poco heterogéneo, así como cuatro estratos de 30 cm asumiendo características similares entre estos como las del Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Características hidráulicas promedio del suelo del lote experimental del INIFAP-CEVAF.

Espesor (cm)	A (%)	L (%)	R (%)	Clase textural	Da (g cm ⁻³)	CC (%)	PMP (%)	SAT (%)	Ks (cm d ⁻¹)
0-30	16.0	24.0	60.0	Arcilla	1.10	49.0	33.0	58	1.2
30-60	7.0	33.0	60.0	Arcilla	1.10	51.0	34.0	59	1.2

A: arena, L: limo, R: arcilla, Da: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, SAT: saturación, Ks: conductividad hidráulica a saturación.

3.3.3.4. Programas de riego

La programación de los riegos de auxilio se realizó mediante la metodología de balance hídrico en tiempo real y el concepto GDD (programación integral) generada y validada para la zona de estudio (Ojeda-Bustamante et al., 2006), considerando una eficiencia de aplicación (EA) de 90% (Apéndice B). En los dos ciclos agrícolas se aplicó un riego de germinación al momento de la siembra para llevar el suelo a CC en todo el perfil de suelo, sin embargo las condiciones iniciales de humedad del suelo en las dos primeras capas después del riego de germinación presentaron humedad menor a CC. La temperatura media del aire (Ta), ET_o y PP que requiere esta metodología se obtuvieron de la EMA del CEVAF; el Cuadro 3.4 muestra un resumen de los riegos aplicados en los dos ciclos agrícolas del experimento.

Cuadro 3.4. Resumen de riegos aplicados en cuatro niveles de déficit hídrico en maíz en el lote experimental INIFAP-CEVAF en los ciclos OI 2017/2018 y 2018/2019.

Ciclo OI	Riegos aplicados	D _{RA1} (días)	D _{URA} (días)	ETc (mm)	Lb _{R1} (mm)	Lb _{R2} (mm)	Lb _{R3} (mm)	Lb _{R4} (mm)
2017/2018	22	38	139	540	623	517	410	303
2018/2019	16	53	151	533	644	533	422	311

D_{RA1}: días al primer riego de auxilio, D_{URA}: días al último riego de auxilio, ETc: requerimiento de riego, Lb: lámina bruta, R1, R2, R3 y R4: porcentaje de suministro de agua con respecto a ETx (máxima) (100, 80, 60, 40% respectivamente).

3.3.4. Parametrización y calibración

Los parámetros conservativos y no conservativos medidos en los dos ciclos agrícolas fueron: cobertura inicial del dosel (CCo), crecimiento del dosel (CCi), productividad del agua normalizada (WP*), índice de cosecha de referencia (HI), densidad de plantas, desarrollo fenológico y máxima profundidad de raíz. Con excepción de CCi, estos parámetros se midieron en sitios representativos ubicados en los dos surcos centrales de cinco metros de largo de cada parcela experimental. CCi se determinó con imágenes digitales adquiridas de un Drone (Apéndice B), utilizando el método OBIA (Object-based image analysis) para análisis de imágenes basado en objetos en el software eCognition developer 9.0 (Trimble, 2014), con la expresión: $CCi = (ACC / ALD) \times 100$, donde ACC es el área clasificada con cultivo (m²) y ALD es el área del lote delimitado (m²). La Figura 3.5 muestra una representación de un segmento del lote experimental donde se aplicó la metodología OBIA.

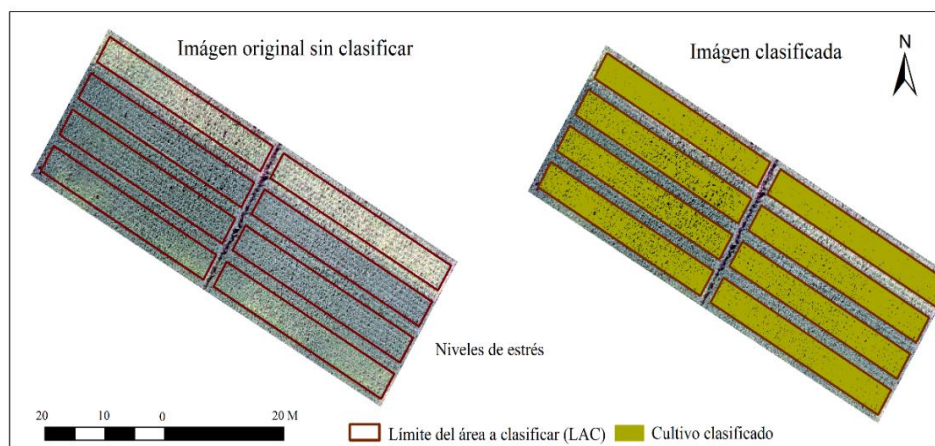


Figura 3.5. Estimación de la cobertura del dosel (CCi) con Drone utilizando el método OBIA (Object-based image analysis).

La calibración del modelo se realizó en tres etapas: 1) calibración de AquaCrop usando parámetros medidos (m), ajustados (a), estimados (e) y parámetros que por default que propone el modelo (d), del tratamiento sin déficit hídrico (R1) ni déficit de N del segundo ciclo (OI 2018/2019), 2) modelación de variables de salida para el resto de los tratamientos de déficit hídrico con parámetros no conservativos (riego, manejo, etc.), 3) modelación del primer ciclo (OI 2017/2018) modificando los parámetros no conservativos (incluyendo condiciones iniciales) y CCx.

3.3.5. Evaluación

La evaluación consistió en la comparación estadística entre los valores experimentales y los resultados simulados de los parámetros CCi, B, Ya, WP, HS, ETc y HI. Los indicadores estadísticos utilizados fueron la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) calculado con la ecuación (3.2).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_s - Y_o)^2}{n}} \quad (3.2)$$

Donde, Y_s representa el valor estimado de la variable analizada, Y_o el valor observado y n es el número de observaciones. El coeficiente o eficiencia de Nash-Sutcliffe (R^2_{NS}), usado para evaluar el poder predictivo de modelos hidráulicos, fue otro indicador de la evaluación, el cual se calcula con la ecuación (3.3), donde, Y_{mo} representa el promedio de los valores observados. Y_o y Y_s ya fueron definidos en el párrafo anterior.

$$R^2_{NS} = 1 - \frac{\sum (Y_o - Y_s)^2}{\sum (Y_o - Y_{mo})^2} \quad (3.3)$$

El coeficiente de masa residual (CMR) es un criterio de evaluación adimensional que también se utilizó, el cual se calcula con la ecuación (3.4), donde Y_{o_i} y Y_{s_i} son los valores observados y simulados en el tiempo i respectivamente.

$$CMR = \frac{[\sum_{i=1}^n Y_{o_i} - \sum_{i=1}^n Y_{s_i}]}{\sum_{i=1}^n Y_{o_i}} \quad (3.4)$$

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Calibración

El Cuadro 3.5 muestra los valores y la forma de determinación de los parámetros del modelo AquaCrop calibrados para maíz en el tratamiento óptimo sin déficit de agua ni de nitrógeno, durante el experimento desarrollado en el ciclo OI 2018/2019 en el CEVAF. Se observa que la mayoría de los parámetros son congruentes con los reportados en diversos trabajos de investigación desarrollados en los últimos 11 años (Greaves & Wang, 2016; Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Paredes et al., 2014), los cuales se especificaron en el Cuadro 3.2, donde además se observa que las temperaturas de desarrollo del cultivo en todos los trabajos son las mismas (8 y 35 ° C) y que en el 50% de los casos se continúa usando AquaCrop en base a DDS. En el presente estudio las temperaturas de desarrollo consideradas fueron 10 y 30 ° C recomendadas para zonas áridas y semiáridas, utilizadas en los últimos 20 años para el monitoreo de la fenología del maíz en la zona de estudio (Sifuentes-Ibarra et al., 2020).

Cuadro 3.5. Valores y forma de determinación de los parámetros conservativos y no conservativos del modelo AquaCrop, calibrados para maíz bajo condiciones óptimas de riego y nitrógeno, durante el ciclo OI 2018/2019 en el norte de Sinaloa, México.

Parámetro	Valor
<u>Parámetros conservativos</u>	
Cobertura del cultivo al 90% de emergencia (% , cm ² planta ⁻¹)	6.5, 0.63
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC) (% día ⁻¹)	8.7 ^a
Coefficiente de declinación del dosel (CDC) (% GDD ⁻¹)	1.135 ^a
Máxima cobertura del dosel (CCx) (%)	95 ^m
Coefficiente de transpiración del cultivo en CCx (Kcb,x)	1.1 ^{ea}
Productividad del agua normalizada (WP*) (g m ⁻²)	35 ^m
Límite de crecimiento del dosel (“p” superior)	0.20 ^a
Límite de crecimiento del dosel (“p” inferior)	0.55 ^a
Factor de estrés para la expansión del dosel (tipo de curva)	2.9 ^d
Límite de conductancia estomática (“p” superior)	0.55 ^d
Factor de estrés estomático que da forma a la curva	6 ^d
Factor de estrés para la senescencia del dosel (“p” superior)	0.55 ^d
Factor de estrés para polinización (“p” superior)	0.76 ^a
Fracción de humedad restada a SAT para condiciones anaeróbicas	5 ^a
GDDA para aumento de HI durante la formación de rendimiento	732 ^e
<u>Parámetros conservativos que dependen del genotipo</u>	
Temperatura mínima para estrés por frío en polinización (° C)	≤ 9 ^{ea}

Parámetro	Valor
Temperatura máxima para estrés por calor en polinización (°C)	≥ 35 ^{ea}
Índice de cosecha de referencia (HIo) (%)	49 ^m
<i><u>Parámetros no conservativos</u></i>	
Método de riego	Goteo
Densidad de plantas	97000 ^m
Profundidad máxima efectiva de la raíz (m)	1.1 ^e
Profundidad mínima efectiva de la raíz (m)	0.3 ^d
GDDA a máxima cobertura del dosel (CCx)	853 ^m
GDDA desde siembra a inicio de senescencia	1447 ^m
GDDA desde siembra hasta madurez (duración del ciclo)	1625 ^m
GDDA desde siembra hasta floración	809 ^m
Duración de la floración en GDDA	196 ^m

m: medido, a: ajustado, e: estimado, d: default

La verificación de la calibración con el experimento del ciclo OI 2017/2018, generó variaciones en algunos parámetros, por ejemplo, en los conservativos el valor de CCo fue de 0.6% (6.5 cm² planta⁻¹), CGC de 10.2 % día⁻¹, CDC de 1.141 % GDD⁻¹ y CCx de 93%. Lo anterior debido a la diferencia en fecha de siembra y a una reducción en la densidad y uniformidad de plantas que alteró la cobertura foliar. Respecto a los no conservativos solo la densidad cambió a 92500 plantas ha⁻¹ pero con influencia en los anteriores. En la Figura 3.6 se muestran los valores simulados (línea) y observados del parámetro CCi medidos de los tres híbridos en los dos ciclos de evaluación. Se observan valores similares entre híbridos en todas las mediciones y un comportamiento parecido a los valores simulados hasta el 60% de desarrollo del cultivo. En el ciclo OI 2017/2018 se refleja el efecto de la densidad de siembra menor y menor uniformidad de plantas, lo cual fue factor para considerar un CCx de 93% menor al encontrado en OI 2018/2019.

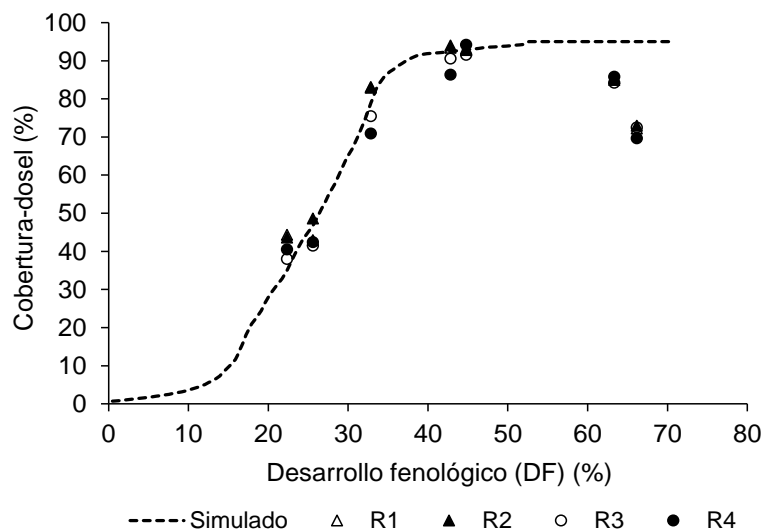


Figura 3.6. Comparación de la cobertura del dosel medida y simulada con AquaCrop en cuatro niveles de estrés (R) en dos ciclos de calibración.

3.4.2. Validación

La Figura 3.7 muestra una comparación entre el rendimiento observado y simulado para los dos ciclos de evaluación en los cuatro niveles de estrés hídrico, donde se aprecia mayor similitud en el segundo año como producto de una mayor uniformidad en la distribución densidad de plantas.

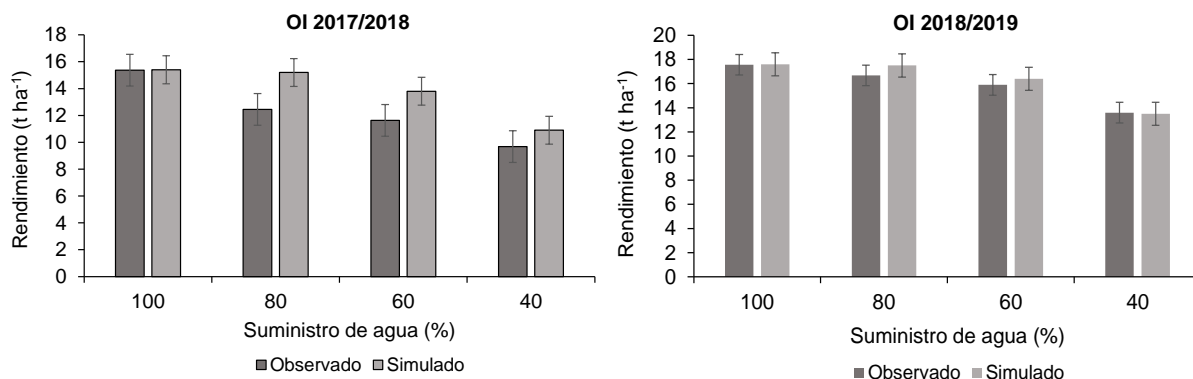


Figura 3.7. Rendimiento observado contra rendimiento simulado con AquaCrop en maíz bajo cuatro tratamientos de déficit hídrico en dos ciclos agrícolas.

La validación de la calibración con la variable rendimiento estadísticamente mostró un nivel alto de precisión con una R^2_{NS} de 0.953 y una CRM de -0.06, lo cual indica una ligera subestimación de AquaCrop en esta variable (Figura 3.8). En la variable CCi el valor de R^2_{NS} fue de 0.87 y de CRM de -0.082, indicando una precisión menor a la anterior, probablemente por efecto de la uniformidad de plantas.

Pawar et al. (2017) reportaron valores de R^2_{NS} desde 0.93 a 0.98 y de CRM de -0.07 a -0.013 en la validación de los parámetros Y_a y biomasa en trabajos de déficit hídrico con AquaCrop.

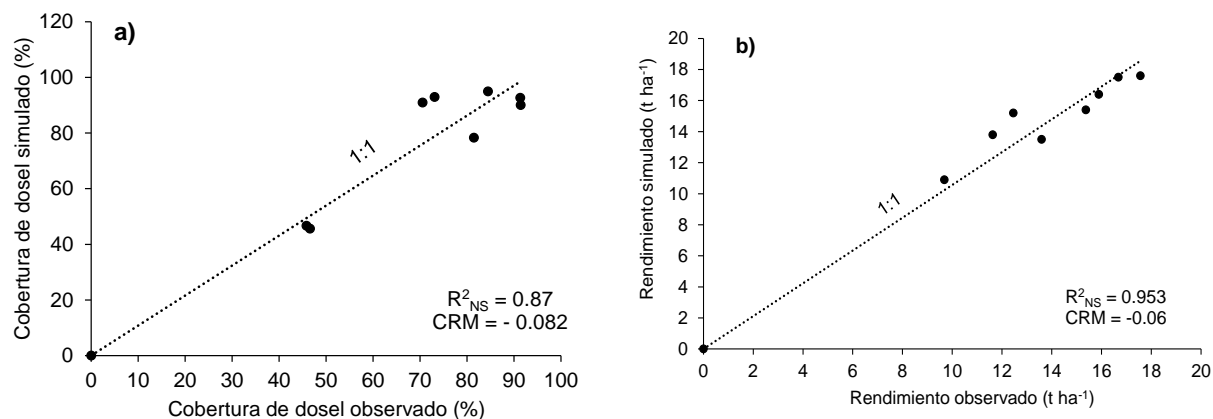


Figura 3.8. Correlación cobertura de dosel CCI (a) y rendimiento (b) observados y simulados en maíz sometido a estrés hídrico

3.4.3. Diferencias relativas (Δx)

En el Cuadro 3.6 se presenta un análisis de diferencias relativas de las variables L_n , L_b , Y_a , Y_s y WPa y WPs con respecto al tratamiento óptimo en los dos ciclos de evaluación. En los dos ciclos L_b fue similar en los cuatro tratamientos de DH con una reducción del 0, 14, 28 y 42% para los tratamientos R1, R2, R3 y R4 respectivamente. En el primer ciclo las variables Y_a y Y_s tuvieron diferencias marcadas, principalmente en R2; en las variables WPa y WPa se observó diferencia en los cuatro tratamientos; tanto Y_s como WPs mostraron valores mayores que los medidos. En el segundo ciclo las diferencias entre las variables medidas y simuladas fueron menores.

Cuadro 3.6. Diferencias relativas (Δx) (%) de variables agronómicas medidas y simuladas con AquaCrop en maíz, bajo riego deficitario en dos ciclos agrícolas Otoño-invierno (OI), en el norte de Sinaloa, México.

Tratamiento	ΔL_n	ΔL_b	ΔY_a	ΔY_s	ΔW_{Pa}	ΔW_{Ps}
<u>Ciclo OI 2017/2018</u>						
R1 (100)	0	0	0	0	0	0
R2 (80)	-20	-14	-19	-1	-6	15
R3 (60)	-40	-28	-24	-10	5	25
R4 (40)	-60	-42	-37	-29	9	22
<u>Ciclo OI 2018/2019</u>						
R1 (100)	0	0	0	0	0	0
R2 (80)	-20	-14	-5	-1	11	16
R3 (60)	-40	-28	-9	-7	26	30
R4 (40)	-60	-42	-23	-23	34	33

Ln: lámina neta, Lb: lámina bruta, Ya: rendimiento obtenido, Ys: rendimiento simulado, WPa: productividad del agua obtenida, WPs: productividad del agua simulada.

3.5. Conclusiones

El modelo AquaCrop mostró ser práctico y versátil en el proceso de calibración de parámetros encontrando valores congruentes con los reportados en trabajos de reciente publicación. El uso de imágenes extraídas de drones para la estimación del parámetro CCi permitió separar el cultivo del suelo de una forma rápida y precisa. La densidad de plantas y la variación en la uniformidad en su distribución en el terreno, son factores que alteran la precisión de la calibración por lo que se tienen que hacer ajustes de algunos parámetros conservativos. La precisión de la calibración fue alta especialmente en el ciclo OI 2018/2019 utilizado para este fin. Por primera vez se cuenta con un AquaCrop calibrado experimentalmente para déficit hídrico en maíz en el norte de Sinaloa y derivar de ello aplicaciones que contribuyan al uso eficiente del agua bajo posibles escenarios de disponibilidad hídrica y cambio climático.

3.6. Referencias

- Abdalhi, M.A.M., Jia, Z., Luo, W., Tang, S., Ali, O.O. & Cheng, J. (2019). FAO AquaCrop Model Performance: in Green Canopy Cover, Soil Moisture and Production of Maize at Middle and Lower Reaches Plain of Yangtze River of China. *Russian Agricultural Sciences*, 45(2), 186–193. <https://doi.org/10.3103/s1068367419020162>
- Acevedo, E., Hsiao, T.C. & Henderson, D.W. (1971). Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physiol.* 48:631–636.

- Atlin, G.N., Cairns, J.E. & Das, B. (2017). Rapid breeding and varietal replacement are critical to adaptation of cropping systems in the developing world to climate change. *Global Food Security*, 12(January), 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.008>
- Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. Irrig. and Drainage Paper no. 33. FAO, Rome.
- Flores, G.H., Ojeda, B.W., Flores, M.H., Sifuentes, I.E., y Mejía, S.E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia* 47 (4): 347-359. 2013. Texcoco, México.
- Giménez, L. (2019). AquaCrop model evaluation in maize under different water availabilities in the western of Uruguay. *International Journal of plant animal and environmental sciences*. 10.21276/Ijpaes. Uruguay.
- Greaves, G.E. & Wang, Y.M. (2016). Assessment of fao aquacrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120557>
- Hamid, A.S., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.A. & Reza, A.S. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. # Springer Science+Business Media Dordrecht 2015. DOI 10.1007/s11269-015-0973-3. Shiraz, Iran
- Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Lobato-Sánchez, R. & Altamirano-Del-Carmen, M.A. (2017). Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 101–116. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-07>
- Oiganji, E., Igbadun, H.E., Mudiare, O.J. & Oyeboode, M.A. (2016). Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in northern zone of Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(3), 1–13.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland-Weiss, H. (2006). Programación intergral del riego en Maíz en el Norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13–25.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Ontiveros-Capurata, R.E., Iñiguez-Covarrubias, M. y Rojano-Aguilar, A. (2014). Proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa. *Sinaloa ante el cambio climático global*, 107–122.
- Paredes, P., de Melo-Abreu, J.P., Alves, I. & Pereira, L.S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.002>

- Rendón, L., Saucedo, H. y Fuentes, C. (2012). Diseño del riego por gravedad (capítulo 7). En: Riego por gravedad, primera edición © Universidad Autónoma de Querétaro. ISBN: 978-607-513-031-6. Qro., México. pp 320-358.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Panorama Agroalimentario 2019. Primera edición, 2019 © Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. 218pp.
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R.E. & Sánchez-Cohen, I. (2020). Improving the monitoring of corn phenology in large agricultural areas using remote sensing data series. *Spanish Journal of Agric. Research (SJAR)*, <https://doi.org/10.5424/sjar/2020183-16269>.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>
- Stewart, J., Hagan, R., Pruitt, W., Danielson, R., Franklin, W., Hanks, R., Riley, J. & Jackson, E. (1977). Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. *Reports, January*.
- Trimble. (2014). eCognition Developer. Munich, Alemania

4. EFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS PERIODOS DE SIEMBRA TRADICIONALES DEL DR075, USANDO AQUACROP

4.1. Resumen

El DR075 “Valle del Fuerte” es el más extenso de México y el mayor productor de maíz y otros alimentos, estableciendo anualmente casi 300000 hectáreas de riego. La intensificación de la variabilidad climática de las últimas tres décadas en esta zona de riego, ha alterado la duración de los ciclos fenológicos de cultivos y sus períodos tradicionales de siembra con impactos negativos en rendimiento y en el servicio de riego. El objetivo del trabajo fue estimar con el modelo AquaCrop, el efecto de escenarios climáticos contrastantes en los periodos de siembra tradicionales de los cultivos de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y papa (*Solanum tuberosum* L.) en el DR075, que permita analizar posibles impactos en su productividad y en la gestión del servicio de riego. La parametrización del modelo se realizó en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP, en la parte central del DR075. En maíz se utilizó información generada en los ciclos OI 2017/2018 y 2018/2019 donde se evaluó el efecto de cuatro niveles de suministro de agua (R) y tres niveles de nitrógeno (N) en la productividad de tres híbridos comerciales de maíz. Para frijol se utilizó información de un experimento establecido en el ciclo OI 2010/2011 en una parcela de una hectárea bajo riego por goteo, donde se evaluaron cuatro dosis de un producto fertilizante a base de algas marinas (adicionado a la fertilización convencional) y el testigo o fertilización convencional. Para papa se utilizó la información generada en un experimento de 0.64 ha bajo riego por goteo establecido el ciclo OI 2013/2014 donde se evaluaron tres niveles de fertilización NPK y la fertilización convencional como testigo. En todos los casos se utilizaron los datos experimentales de los tratamientos sin déficit hídrico ni nutrimental. La calibración y validación del modelo mostró buen nivel de precisión en los tres cultivos con los parámetros Rendimiento (Ya), Biomasa (B) y requerimientos de riego (RR). Se determinaron periodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos (Frío, Neutro y Caliente) y su impacto en productividad de cultivos y en el servicio de riego.

Palabras clave: *Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris*, *Solanum tuberosum* L., productividad de cultivos, gestión del servicio de riego.

4.2. Introducción

México cuenta con 24.6 millones de hectáreas para la agricultura, de las cuales se cultivan 21.2 millones y solo cerca del 30% de esta superficie se encuentra bajo riego (SIAP, 2019). Las zonas de riego están compuestas por 86 Distritos de Riego (DR) (3.3 millones de hectáreas) y 560000 usuarios, agrupadas en 469 Asociaciones Civiles de Usuarios (ACU) y 15 Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRL). Existen también áreas bajo riego fuera de los Distritos, que se conocen como Unidades de Riego (UR) que en esencia tienen los mismos objetivos que los DR. Las regiones del norte, centro y noroeste cuentan con solo la tercera parte del agua renovable del país, sin embargo, aportan el 80% al PIB nacional (CONAGUA, 2018). Los DR más extensos y productivos se encuentran en la región noroeste del país, como el DR075 “Valle del Fuerte” al norte de Sinaloa, con casi 300000 ha de riego y el mayor productor de maíz con rendimiento medio de 12.5 t ha⁻¹ y una producción de cinco a siete millones de toneladas por año (SIAP, 2019).

En esta zona se han reportado anomalías de algunas variables climáticas como temperatura y precipitación, probablemente debidas al efecto del cambio climático. Algunos estudios señalan una tendencia del incremento de la temperatura de 1 a 2 °C en el norte de Sinaloa (Castillo-Castillo et al., 2017; Lobato y Altamirano, 2017). Este efecto está ocasionando la intensificación de la tasa de desarrollo de la mayoría de los cultivos, debido a una acumulación más rápida de los requerimientos de calor, provocando reducción del ciclo fenológico y un efecto negativo en el rendimiento afectando también la planeación y el servicio de riego (Ojeda-Bustamante et al., 2014). Otro efecto es la intensificación de la variabilidad climática a nivel local es la presencia de eventos climáticos extremos, ciclos agrícolas fríos y calientes, lluvias más intensas fuera de los periodos típicos (Bindoff et al., 2013), provocando que las recomendaciones tradicionales para el manejo de cultivos como los períodos de siembra, ya no sean las más adecuadas. Ante este escenario, se requiere de tecnologías que permitan al productor visualizar posibles escenarios climáticos y sus efectos en el desarrollo de sus cultivos.

Las zonas de riego de México todavía no cuentan con este tipo de herramientas tecnológicas para la programación de siembras considerando escenarios climáticos contrastantes, todavía se utilizan los periodos tradicionales, con impactos negativos en el rendimiento de cultivos y el servicio de riego.

La modelación de sistemas biológicos completos para la producción de alimentos considerando variabilidad y cambio climático, suelo y secuestro de carbono, actualmente ha tomado gran impacto en la seguridad alimentaria y sostenibilidad del medio ambiente. La principal desventajas de los modelos de simulación desarrollados a principios del nuevo milenio, es el gran número de parámetros que demandan habilidades avanzadas para su calibración y operación, y que son específicos por variedad o híbrido (Hernández et al., 2009).

Uno de los modelos más recientes relacionados con la ingeniería de riego es el modelo AquaCrop el cual usa un número reducido de parámetros y se pueden aplicar a cualquier región; es de fácil manejo y aún no se ha utilizado en su totalidad con fines de planificación. Steduto et al., (2014) describieron a este modelo como dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua, bajo diversas condiciones ambientales y de manejo, incluidos escenarios derivados del cambio climático, sin embargo, no contempla los efectos de plagas ni enfermedades como sucede de la mayoría de los modelos de simulación.

Aunque se han hecho intentos por utilizar el modelo AquaCrop en el norte de Sinaloa, sus aplicaciones carecen de respaldo experimental y más aún no se ha estudiado el efecto de la variabilidad climática en los periodos tradicionales de siembra, dejando a los productores vulnerables ante escenarios climáticos imprevistos que rebasan sus capacidades de adaptación pronta al manejo de sus cultivos (Flores et al., 2013).

La vinculación del modelo AquaCrop con posibles escenarios climáticos durante los ciclos de desarrollo de los cultivos, permite visualizar sus efectos en rendimiento asociado a fechas de siembra, es por esto que el objetivo del presente estudio fue estimar el efecto de posibles escenarios climáticos en el rendimiento y en los periodos de siembra tradicionales de los principales cultivos ciclo OI del DR075 usando el modelo AquaCrop, analizando posibles impactos en la productividad de cultivos y en la gestión del servicio de riego.

4.3. Materiales y métodos

4.3.1. Descripción de la zona de estudio

El trabajo se desarrolló, en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y en una sección de riego del módulo de riego Batequis II-2 ubicados en la parte central DR075, en la región norte de Sinaloa en las coordenadas 25°45' N y -108° 51' O a una altitud de 15 msnm (Figura 4.1).

Esta región recibe una precipitación promedio anual de 352 mm en los meses de julio a septiembre donde no se tienen cultivos establecidos o la superficie sembrada es mínima. Tiene una temperatura media anual de 25 ° C con clima considerado como cálido seco estepario tipo desértico durante el verano, aunque en los últimos 20 años se ha observado alta variabilidad climática.

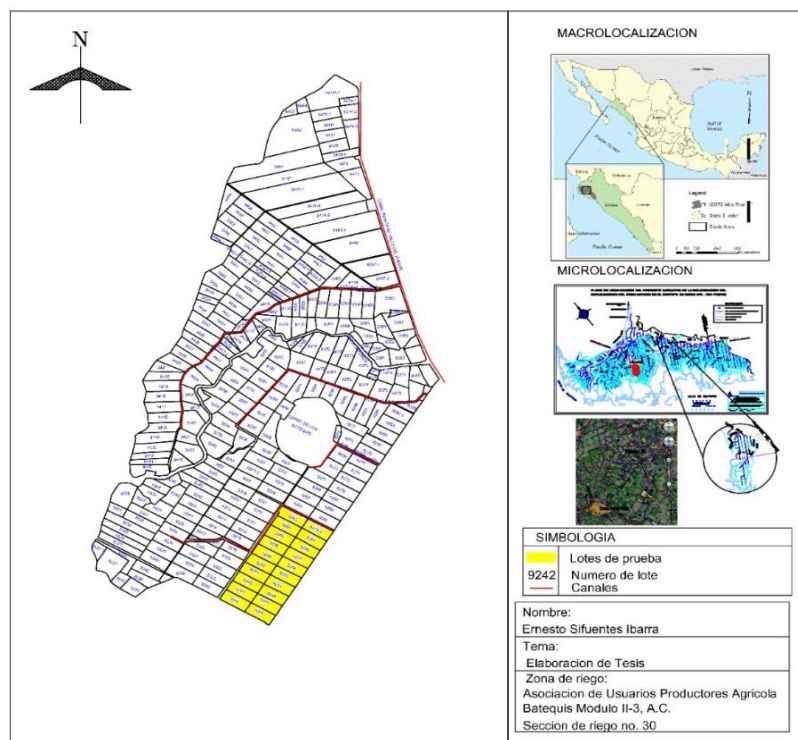


Figura 4.1. Ubicación de la zona de estudio

La principal actividad económica del estado de Sinaloa es la agricultura de riego, la cual depende de 11 presas ubicadas en ocho municipios que sirven a siete DR de donde se benefician más de 78000 usuarios y casi 740000 hectáreas de cultivo. El principal ciclo agrícola de la región es el OI donde se establecen en su mayoría maíz, frijol y papa bajo un escenario de disponibilidad hídrica normal, con superficie global de más de 212000 ha que representan el 81% del total, con una derrama económica de más de 13000 millones de pesos (77% del total) (SIAP, 2019). El periodo de siembra recomendado para maíz es del 25 de octubre al 30 de noviembre, el de frijol del primero de octubre al cinco de noviembre y el de papa del primero de octubre al 15 de noviembre. En el ciclo primavera-verano (PV) el principal cultivo es sorgo-grano estableciéndose alrededor de 26000 ha con un valor de la producción de casi 650 millones de pesos. Dentro de los frutales el más importante es el mango con más de 3000 ha establecidas y un valor de la producción de 315 millones de pesos (INIFAP, 2017).

4.3.2. Análisis de variabilidad y cambio climático

Un análisis de variabilidad y cambio climático se realizó en la zona de estudio para dos propósitos: 1) determinar la intensidad de las anomalías y tendencias de cambio climático de la zona y 2) definir la intensidad de la variabilidad climática usando los principales cultivos como indicadores y la variable grados-día desarrollo (GDD). Para el primer caso se usó una serie histórica de temperaturas diarias media (T_a), mínima (T_{\min}) y máxima (T_{\max}) de la estación Ruíz Cortines-25080 del SMN (CLICOM) periodo 1983-2012, a la cual se le aplicaron protocolos de control de calidad de la información previo al análisis. Con esta información se realizó un análisis de significancia con los promedios anuales, comparando siete periodos consecutivos de cinco años a partir del año 1983 y el periodo de referencia 1983-2012; también se determinaron las anomalías térmicas de cada periodo con respecto al valor de referencia. Un análisis similar al anterior se realizó con la variable temperatura diurna (T_d), donde se incluyeron además del análisis anual, dos análisis estacionales: noviembre-marzo y abril-agosto. El cálculo de T_d se realizó con la ecuación (4.1) reportada por Ruíz et al. (2011).

$$T_d = \frac{[(T_{\max} - T_{\min}) (11 - T_o)]}{4(12 - T_o) \text{ASEN} \left[\pi \frac{11 - T_o}{11 + T_o} \right]} \quad (4.1)$$

Donde, T_d es la temperatura diurna media mensual ($^{\circ}\text{C}$), T_{\max} la temperatura máxima media mensual ($^{\circ}\text{C}$), T_{\min} es la temperatura mínima media mensual ($^{\circ}\text{C}$), T_o es una variable de ajuste al fotoperiodo calculada con la relación $12 - 0.5N$ [N es el fotoperiodo del día 15 de cada mes (h)], ASEN representa el arco-seno (radianes) y π es la constante Pi (3.1416).

El análisis de variabilidad climática estacional OI se realizó del período 1997-2020, usando como variables de análisis T_a y los grados-día acumulados (GDDA) en los periodos promedio de desarrollo desde siembra a madurez (DDS) de los cultivos estudiados, considerando la fecha de siembra intermedia (FST) del periodo recomendado por INIFAP (2017). Los registros históricos de T_a se obtuvieron de una estación meteorológica automatizada (EMA) ubicada en el CEVAF perteneciente a la red nacional de estaciones automatizadas del INIFAP (<https://clima.inifap.gob.mx/>), calculando los GDD con la metodología reportada por Ojeda-Bustamante et al., (2006) en la misma localidad. Los ciclos agrícolas históricos se agruparon en Fríos (F), Neutros (N) y Calientes (C) calculando anomalías de los valores obtenidos de GDDA.

El Cuadro 4.1 muestran los valores de las variables utilizadas para la agrupación climática de la serie histórica de Ta 2017-2020.

Cuadro 4.1. Variables utilizadas para agrupación climática por temperatura del aire de los principales cultivos del DR-075, Río Fuerte, Sinaloa.

Cultivo	FST	DPC (días)	Tu _{máx} (° C)	Tu _{mín} (° C)	Intervalo GDDA (° C)		
					Frío (F)	Neutro (N)	Caliente (C)
Maíz	12/11	153	30	10	1100-1200	1201-1300	>1300
Frijol	19/10	110	23	8	1000-1100	1101-1200	>1200
Papa	23/10	105	29	2	1600-1700	1701-1800	>1800

FST: fecha de siembra típica, DPC: duración promedio del ciclo, GDDA: grados-día desarrollo acumulados, Tu_{máx}: temperatura umbral máxima del cultivo, Tu_{mín}: temperatura umbral mínima del cultivo.

4.3.3. Parametrización, calibración y validación del modelo

4.3.3.1. Trabajo experimental

Para el presente estudio se utilizó información generada en trabajos experimentales realizados durante varios ciclos agrícolas en el CEVAF para los cultivos de maíz, frijol y papa en lotes experimentales con suelo característico de la zona: textura arcillosa, densidad aparente (Da) 1.10 a 1.15 g cm⁻³, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), saturación (SAT) y humedad aprovechable (HA) de 0.52, 0.36, 0.57 y 0.16 cm³cm⁻³, respectivamente y sin problema de sales solubles.

En maíz se utilizaron los resultados de la calibración de un experimento establecido en una parcela de 2.5 ha bajo riego por goteo durante los ciclos OI 2017/2018 y 2018-2019 descrito en el Capítulo 3. Para frijol se utilizó información de un experimento establecido el 11/11/2010 (ciclo OI 2010-2011) en una parcela de 1 ha bajo riego por goteo, donde se evaluaron cuatro dosis de un producto fertilizante a base de algas marinas (adicionado a la fertilización convencional) y el testigo o fertilización convencional. Para papa se utilizó la información generada en un experimento de 0.64 ha bajo riego por goteo establecido el 07/11/2013 (ciclo OI 2013/2014) donde se evaluaron tres niveles de fertilización NPK y la fertilización convencional como testigo. En todos los casos se utilizaron los datos experimentales de los tratamientos sin déficit hídrico ni nutrimental.

La programación y seguimiento de los riegos se realizó mediante balance hídrico a través de la plataforma IRRIMODEL© (Sifuentes-Ibarra et al., 2015) que utiliza un modelo de programación integral del riego basado en GDD calibrado y validado en la zona de estudio (Ojeda-Bustamante et al., 2004; Ojeda-Bustamante et al., 2006). La evapotranspiración de referencia (ET_o) (calculada con Penman-Monteith modificado), T_a y precipitación (PP) que requiere la plataforma se obtuvieron de la EMA ubicada en el CEVAF.

4.3.3.2. Parametrización

Se determinaron parámetros conservativos y no conservativos, los primeros se refieren a los que no son afectados por el manejo y genotipo y no cambian de un lugar y sistema a otros. Los no conservativos dependen del genotipo, prácticas de manejo y lugar y son los que se generaron en forma experimental. En todos los experimentos se midieron las variables Fenología, Biomasa (B), Rendimiento (Y_a) e Índice de cosecha (HI). La primera con la plataforma IRRIMODEL© y observaciones de campo, estimando también la variación diaria de la humedad del suelo en la zona de raíces, verificada con sensores de humedad portátiles TDR. En los dos trabajos de maíz, además de las variables anteriores se determinó la cobertura del dosel (CCi) a partir de imágenes adquiridas de un Drone utilizando el método OBIA (Object-based image analysis) para análisis de imágenes basado en objetos en el software eCognition developer 9.0 (Trimble, 2014), con la expresión: $CCi = (ACC / ALL) \times 100$, donde ACC es el área clasificada con cultivo (m^2) y ALL es el área del lote delimitado (m^2).

4.3.3.3. Calibración

Una plataforma de trabajo se estructuró para disponer de datos de entrada organizados de los componentes: clima, cultivo, suelo y riego en el software AquaCrop 6.1 estándar de libre acceso (<http://www.fao.org/aquacrop/software/>), para la calibración de los cultivos estudiados.

Clima

La base de datos climática consistió de una serie histórica de 13 ciclos OI con valores diarios de $T_{máx}$ y $T_{mín}$ ($^{\circ}C$), Precipitación (P) y Evapotranspiración de referencia (ET_o) (mm), adquiridos de la Estación Meteorológica Automatizada (EMA) del CEVAF. También se usaron valores de CO_2 (ppm) predeterminados por AquaCrop cuya fuente es el Observatorio de Mauna Loa en Hawai desde 1902.

Cultivo

Estos datos se refieren a todos los parámetros conservativos y no conservativos que requiere el modelo, determinados en forma experimental, ajustados o predefinidos por default, como DDS o GDDA para la emergencia, floración, senescencia y madurez, densidad de plantas (Dp), temperaturas de desarrollo del cultivo (basal y máxima), coeficiente de cultivo para máxima transpiración (Kcb, x), máxima profundidad de raíz (Pr_{máx}), HI y CCI entre otros.

Suelo

Los datos de suelo se refieren al abatimiento y balance de agua en suelo. Dentro de los primeros se encuentran los valores superior e inferior del abatimiento del agua del suelo para la expansión del dosel, control estomático, senescencia y polinización. También se especifica la humedad del suelo que genera condiciones anaeróbicas. Respecto al balance de agua se deben especificar el agua fácilmente evaporativa y el número de curva.

Riego

La información de riego requerida por AquaCrop es la siguiente, método de riego, fechas y láminas de riego aplicadas. En todos los trabajos experimentales se dio un riego de germinación para uniformizar la humedad en la zona de raíces, los riegos de auxilio se aplicaron semanalmente calculando volúmenes y láminas de riego con la plataforma IRRIMODEL©.

4.3.3.4. Validación y aplicación

La validación se realizó comparando los valores de B, Ya, CCx, HS, HI y ETc generados de los trabajos de campo, con los datos simulados por el modelo para determinar la precisión de la calibración. Los indicadores estadísticos utilizados fueron el coeficiente o eficiencia de Nash-Sutcliffe (R²_{NS}) y el coeficiente de masa residual (CMR). El primero se calculó con la ecuación (4.2), donde Yo es el valor observado y Ys el simulado, Ymo representa el promedio de los valores observados.

$$R_{NS}^2 = 1 - \frac{\sum (Y_o - Y_s)^2}{\sum (Y_o - Y_{mo})^2} \quad (4.2)$$

CMR es un criterio de evaluación adimensional calculado con la ecuación (4.3), donde Yo_i y Ys_i son los valores observados y simulados en el tiempo i respectivamente.

$$CMR = \frac{[\sum_{i=n}^n Y_{O_i} - \sum_{i=1}^n Y_{S_i}]}{\sum_{i=1}^n Y_{O_i}} \quad (4.3)$$

Una vez validado el modelo, se estimaron biomasa y rendimiento decenales (septiembre-diciembre) para los años F, N y C de la serie climática en forma separada, Con los resultados obtenidos se identificaron los periodos óptimos de siembra para los tres cultivos en los tres escenarios climáticos. Posteriormente se realizó un análisis del efecto de los periodos óptimos de siembra en la productividad de 17 parcelas comerciales de maíz ciclo OI 2018/2019, establecidas en el área compacta del MR Batequis II-3, analizando también su efecto en la gestión del servicio de riego.

4.4. Resultados y discusión

4.4.1. Tendencias de cambio climático

El Cuadro 4.2 muestra un análisis de significancias de $T_{m\acute{a}x}$, T_{med} y $T_{m\acute{i}n}$ de seis periodos de tiempo de cinco años a partir de 1983 y el periodo de referencia (1983-2012), así como las anomalías encontradas respecto al periodo de referencia, en el norte de Sinaloa. Se puede observar que en $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ no se encontraron diferencias estadísticas significativas de acuerdo a Tukey ($p = 0.05$), pero se aprecia una clara tendencia hacia un incremento de las dos variables desde el periodo 1983-1987, donde $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ presentaron anomalías de -0.43 y $-0,24$ ° C respectivamente con incrementos en los periodos siguientes superando el valor de referencia, lo cual indica una mayor oscilación térmica con tendencia hacia la desertificación como lo menciona el IPCC (2014).

En la comparación con T_{med} , los periodos 1988-1992, 2003-2007, 2008-2012 y 1983-2012 no mostraron diferencia estadística significativa entre ellos, al igual que los periodos 1993-1997 y 1998-2002; el primer periodo si fue estadísticamente diferente al presentar el valor más bajo que el resto de los periodos (24.08 ° C). A excepción del primero, los valores de temperatura de los periodos fueron mayores que el de referencia, destacando 1993-1997 con 25.44 ° C y una anomalía de $+0.34$ ° C.

Cuadro 4.2. Temperatura máxima, media y mínima (o C) en siete periodos de tiempo y anomalías térmicas con respecto al periodo de referencia (1983-2012), en el norte de Sinaloa.

Periodo	Temperatura máxima		Temperatura mínima		Temperatura media	
	Media	Anomalía	Media	Anomalía	Media	Anomalía
1983-1987	33.20 ^a	-0.43	16.70 ^a	-0.24	24.08 ^b	-1.03
1988-1992	33.44 ^a	-0.19	17.07 ^a	0.13	25.25 ^{ab}	0.14
1993-1997	33.76 ^a	0.13	17.23 ^a	0.30	25.44 ^a	0.34
1998-2002	33.85 ^a	0.22	16.80 ^a	-0.14	25.32 ^a	0.22
2003-2007	33.50 ^a	-0.14	17.08 ^a	0.15	25.29 ^{ab}	0.18
2008-2012	34.06 ^a	0.42	16.81 ^a	-0.12	25.26 ^{ab}	0.15
Referencia (1983-2012)	33.64 ^a		16.94 ^a		25.11 ^{ab}	
DMS	0.9049		1.1936		1.2119	

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Respecto a las variaciones en superficie de la temperatura diurna (Td), tanto en el análisis anual y en los dos estacionales, la temperatura de los dos primeros periodos fue menor que el de referencia, incrementándose en forma constante a partir del tercer periodo donde siempre fue mayor al de referencia, destacando 2003-2007 con un valor de 34.11 ° C y una anomalía de +0.27 ° C, comportamiento que es congruente en lo general con el análisis anterior; en ningún caso se encontró diferencia estadística significativa (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Variación de la temperatura diurna (Td) (o C) en la superficie en tres periodos de tiempo en el norte de Sinaloa, México.

Periodo	Enero-Diciembre		Noviembre-Marzo		Abril-Agosto	
	Media	Anomalía	Media	Anomalía	Media	Anomalía
1983-1987	29.13 ^a	-0.44	23.88 ^a	-0.17	33.34 ^a	-0.50
1988-1992	29.49 ^a	-0.08	23.96 ^a	-0.09	33.65 ^a	-0.18
1993-1997	29.70 ^a	0.13	24.63 ^a	0.57	33.91 ^a	0.08
1998-2002	29.73 ^a	0.16	24.06 ^a	0.00	34.09 ^a	0.26
2003-2007	29.57 ^a	0.00	23.78 ^a	-0.28	34.11 ^a	0.27
2008-2012	29.80 ^a	0.23	24.03 ^a	-0.03	33.91 ^a	0.07
Referencia (1983-2012)	29.57 ^a		24.06 ^a		33.83 ^a	
DMS	0.6665		1.2224		0.8592	

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

4.4.2. Variabilidad climática

La Figura 4.2 muestra el comportamiento histórico de la acumulación de GDD de maíz, frijol y papa, y su relación con el tipo de ciclo OI [frío (F), neutro (N) o caliente (C)] definido para la zona de estudio. Se puede observar que de los 23 ciclos OI analizados seis quedaron como años F, nueve como N y ochos como C, destacando la presencia de años C desde el ciclo 2013/2014 al 2017/2018, lo cual es congruente con los resultados encontrados por Castillo-Castillo et al. (2017) para esta misma región. Este comportamiento demuestra el efecto de la variabilidad climática y justifica la necesidad de analizar su efecto en el manejo tradicional de los cultivos iniciando con los periodos de siembra.

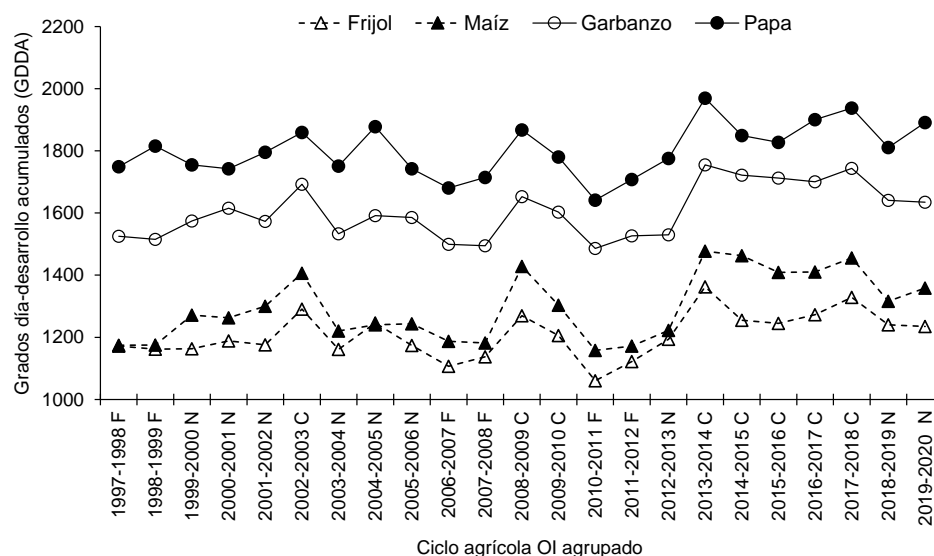


Figura 4.2. Comportamiento histórico de la acumulación de GDD de maíz, frijol y papa, y su relación con el tipo de ciclo OI [frío (F), neutro (N) o caliente (C)], en el DR075.

4.4.3. Calibración y validación del modelo

En el Cuadro 4.4 se presentan los valores conservativos y no conservativos determinados del modelo AquaCrop para los cultivos de maíz, frijol y papa para las condiciones del DR075, señalando también el modo de determinación. Los valores de maíz son los presentados en el Capítulo 3, los de frijol en su mayoría son similares a los reportados por Espadafor et al. (2017), Joshua et al. (2015), Dourado et al. (2019) y Tornés et al. (2016); para papa coinciden con los reportados por Montoya et al. (2015) y Linker et al. (2016). Las temperaturas de desarrollo basales y máximas utilizadas para frijol fueron 8 y 23 °C y para papa 2 y 29 °C.

Cuadro 4.4. Parámetros conservativos y no conservativos para la calibración del modelo AquaCrop en los principales cultivos del norte de Sinaloa, México.

Parámetro	Maíz	Frijol	Papa	Determinación
<i>Parámetros conservativos</i>				
Cobertura del cultivo al 90% de emergencia (% cm ² planta ⁻¹)	6.5, 0.63	1, 5	0.30, 6	e
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC) (% día ⁻¹)	8.7	16.9	29.4	a
Coefficiente de declinación del dosel (CDC) (% GDD ⁻¹)	1.135	0.8827	0.615	a
Máxima cobertura del dosel (CCx) (%)	95	90	96	m
Coefficiente de transpiración del cultivo en CCx (Kcb,x)	1.1	1.05	1.2	m
Productividad del agua normalizada (WP*) (g m ⁻²)	35	17	20	m
Límite de crecimiento del dosel (“p” superior)	0.20	0.15	0.25	a
Límite de crecimiento del dosel (“p” inferior)	0.55	0.65	0.60	a
Factor de estrés para la expansión del dosel (tipo de curva)	2.9	3	4	d
Límite de conductancia estomática (“p” superior)	0.55	0.5	0.65	d
Factor de estrés estomático que da forma a la curva	6	3	2.5	d
Factor de estrés para la senescencia del dosel (“p” superior)	0.55	0.7	0.55	d
Factor de estrés para polinización (“p” superior)	0.76	0.85	NA	a
Fracción de humedad volumétrica restada a SAT para condiciones anaeróbicas (%)	5	5	5	a
GDDA para aumento de HI durante la formación de rendimiento	732	340	984	a
<i>Parámetros conservativos que dependen del genotipo</i>				
Temperatura mínima para estrés por frío en polinización (°C)	≤ 9	8	NA	a
Temperatura máxima para estrés por calor en polinización (°C)	≥ 35	35	NA	a
Índice de cosecha de referencia (HIo) (%)	49	33	84	m
<i>Parámetros no conservativos</i>				
Método de riego	G	G	S	
Densidad de plantas	97000	200000	50000	m

Parámetro	Maíz	Frijol	Papa	Determinación
Profundidad máxima efectiva de la raíz (m)	1.1	0.6	0.6	m
GDDA a máxima cobertura del dosel (CCx)	853	510	950	m
GDDA desde la siembra hasta el inicio de la formación de tubérculo	NA	NA	1080	m
GDDA desde siembra hasta floración	809	502	NA	m
Duración de la floración en GDDA	196	150	NA	m
GDDA desde siembra a inicio de senescencia	1447	1000	1749	m
GDDA desde siembra hasta madurez (duración del ciclo)	1625	1235	2061	m

m: medido, a: ajustado, e: estimado, d: default, NA: no aplica. G: goteo, S: superficial (gravedad)

En el Cuadro 4.5 se muestra la comparación entre los valores medidos experimentalmente y los simulados con el modelo de las variables B, Ya, HI y ETc en los tres cultivos analizados, donde se observa diferencias porcentuales bajas entre estas, lo cual indica una aceptable calibración de los tres cultivos.

Cuadro 4.5. Variables de crecimiento medidas versus modeladas con AquaCrop de tres cultivos bajo condiciones óptimas de manejo.

Variable	Maíz			Frijol			Papa		
	MED	SIM	ΔR	MED	SIM	ΔR	MED	SIM	ΔR
B (t ha ⁻¹)	39.4	35.9	-8.9	10.1	9.5	-5.9	18.0	18.5	+2.8
Y (t ha ⁻¹)	17.6	17.6	0.0	3.3	3.2	-3.0	42.1	41.3	-1.9
HI (%)	50.0	49.0	-2.0	33.0	33.5	+1.5	85.0	85.7	+0.8
ET _c (mm)	532	548	+3.0	388	343	-11.6	352	346	-1.7

B: biomasa, Y: rendimiento, HI: índice de cosecha, ET_c: evapotranspiración del cultivo, MED: medida, SIM: simulada, ΔR : diferencia relativa (%).

4.4.4. *Periodos óptimos de siembra*

En la Figura 4.3 se presenta el efecto de la fecha de siembra (septiembre a diciembre) en la producción de biomasa y rendimiento de maíz OI bajo tres escenarios climáticos en el DR075. En el escenario F se estimó una variación de rendimiento de 14.3 a 18.7 t ha⁻¹ y un periodo óptimo desde el día 288 al 319. En el escenario N la variación de rendimiento fue de 13.8 a 18.4 t ha⁻¹ y un período óptimo estimado desde el DJ 278 al 319.

Para el escenario C la variación de rendimiento fue de 13.8 a 18.4 t ha⁻¹ con un periodo comprendido desde el día 278 al 309. El periodo más amplio se obtuvo en el escenario N con un comportamiento horizontal de la curva; en los otros escenarios el periodo fue más reducido y con mayor caída del rendimiento en los extremos de las curvas.

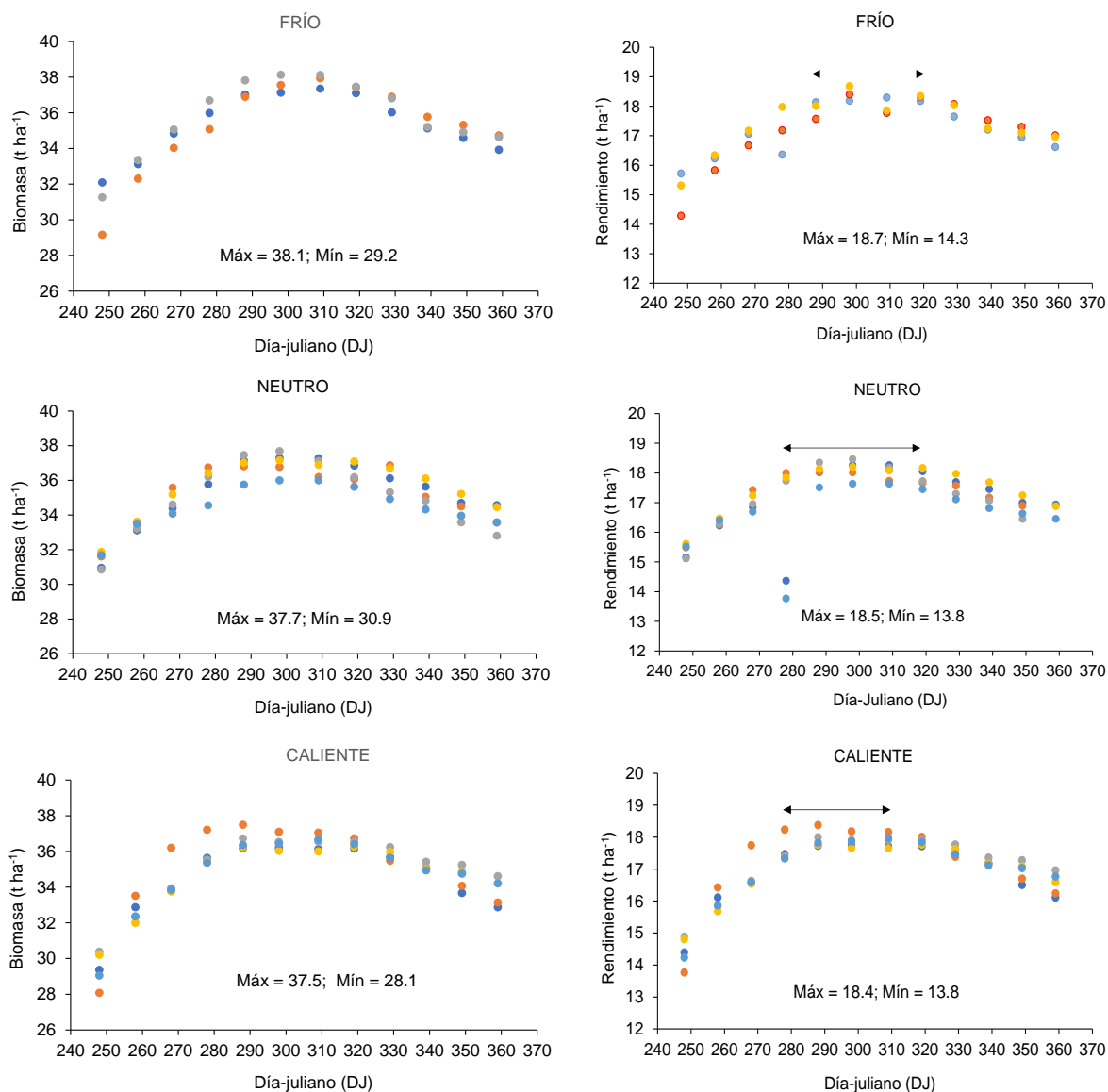


Figura 4.3. Producción de biomasa, rendimiento de grano y períodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos para maíz en el DR-075.

En frijol (Figura 4.4) se encontró un comportamiento similar al maíz en el escenario N con una variación en rendimientos de 2.4 a 3.6 t ha⁻¹ y un periodo de siembra que comprende desde el DJ 278 al 319. En los otros escenarios el período se redujo a la mitad, en F fue desde el DJ 288 a 309 y en C desde el DJ 298 a 319. En C se observa una mayor diferencia en rendimiento variando desde 1.8 a 3.6 t ha⁻¹, probablemente por la sensibilidad del cultivo a las altas temperaturas.

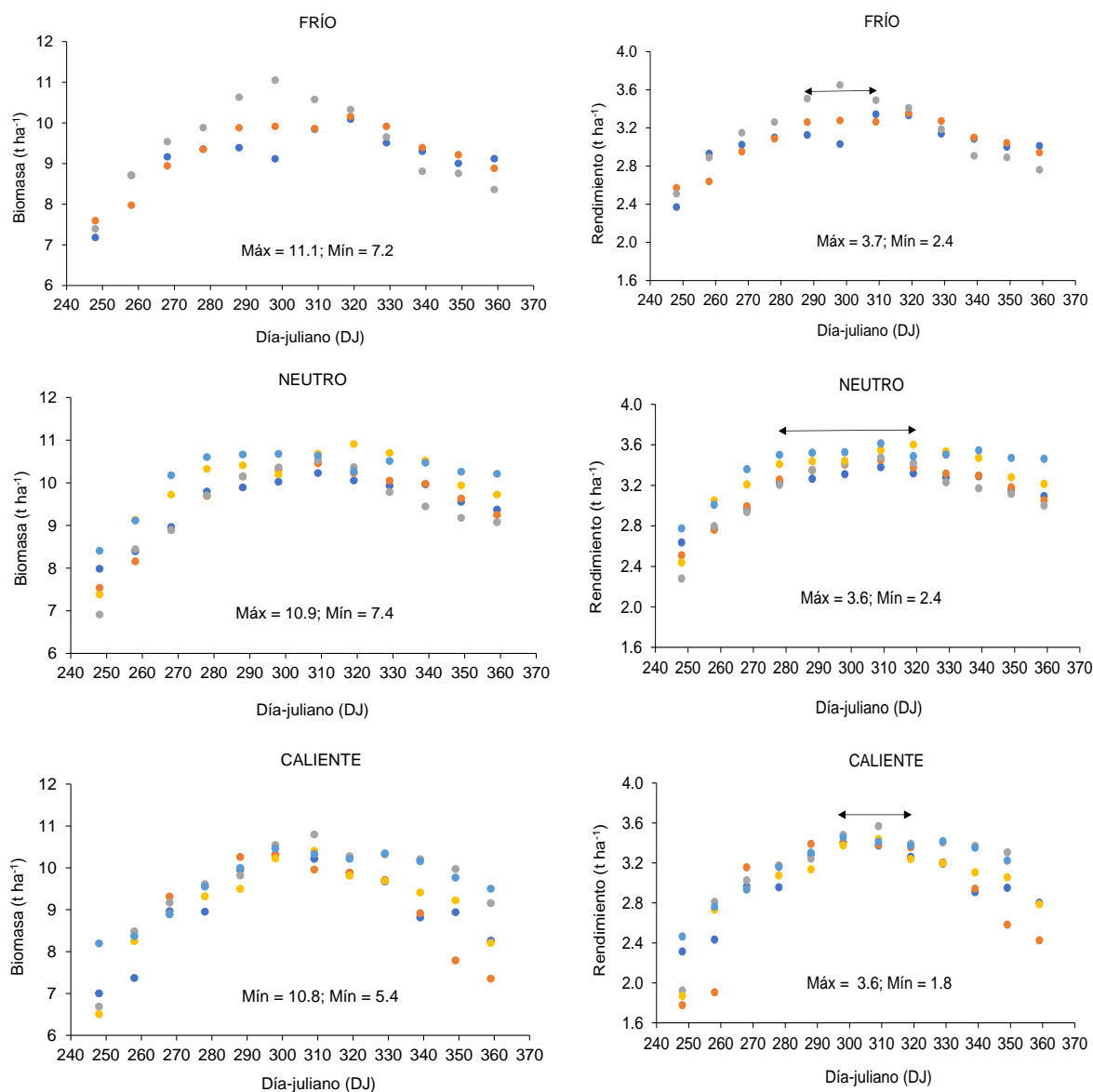


Figura 4.4. Producción de biomasa, rendimiento de grano y períodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos para frijol en el DR-075.

En papa (Figura 4.5) la variación de rendimientos fue más marcada en los tres escenarios que los otros cultivos, en el escenario F el rendimiento varió de 20 a 44.4 t ha⁻¹, con un período óptimo del día 288 al 319.

En el escenario N la variación en rendimiento fue de 20.9 a 43.2 t ha⁻¹ con un período óptimo más amplio comprendido desde el día 288 al 329. En el escenario C el rendimiento varió desde 16.2 hasta 41.2 t ha⁻¹ con un periodo óptimo desde el día 298 al 329. En el escenario F se observa un desplazamiento hacia la zona de temperaturas altas y en el C hacia la zona fría con caídas más fuertes de las curvas en los extremos que N.

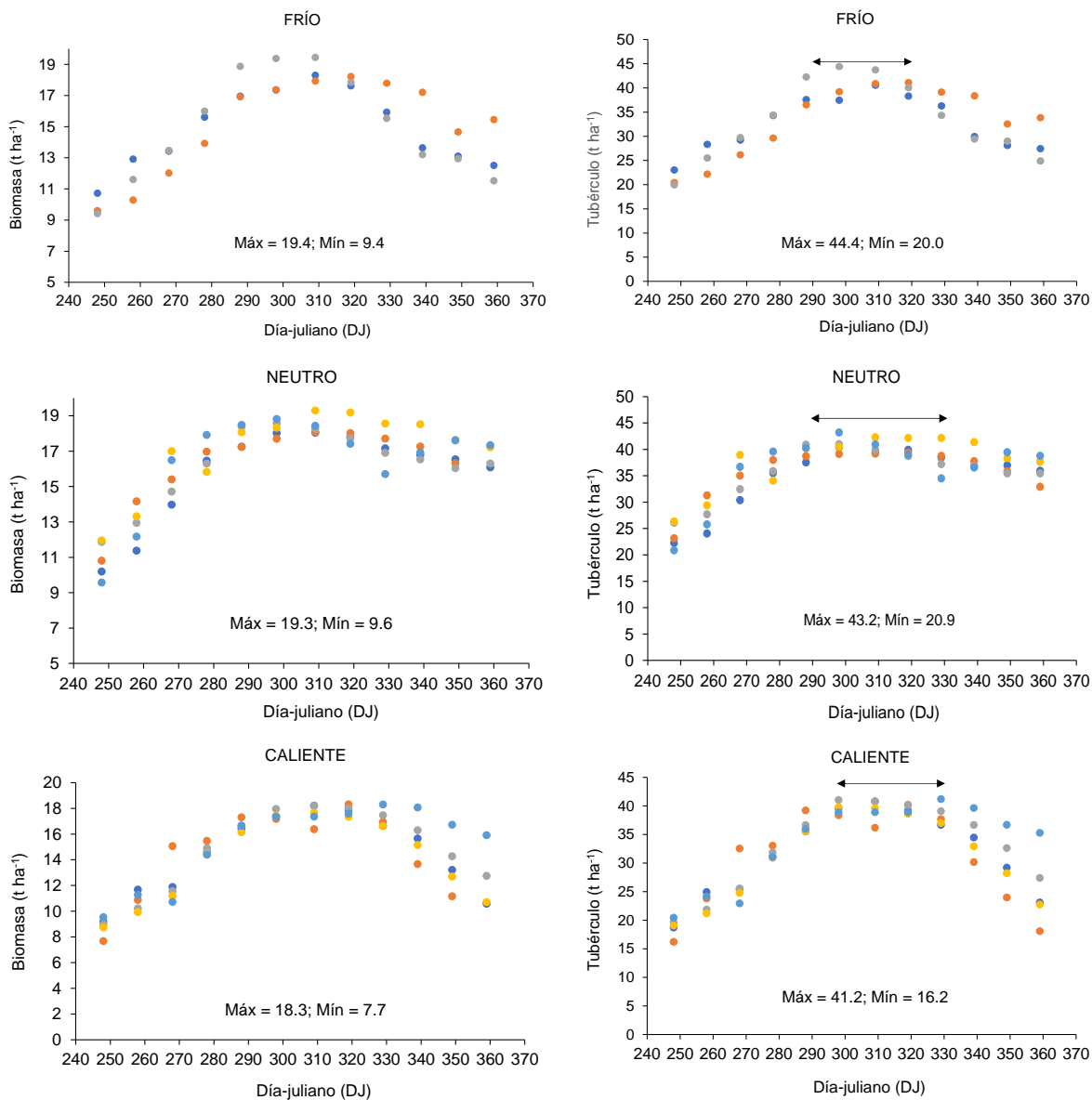


Figura 4.5. Producción de biomasa, tubérculos y períodos óptimos de siembra en tres escenarios climáticos para papa en el DR075.

4.4.5. Análisis de productividad

El Cuadro 4.6 muestra en forma resumida una comparación entre la fecha de siembra tradicional (FST) y la fecha de siembra recomendada (FSR) que genera el máximo rendimiento (Y_x) para los tres cultivos analizados. En maíz se observa una tendencia a adelantar 19 días la fecha de siembra con respecto a la FST en años F y N, mientras en años C se sugiere adelantarla 29 días. En frijol el modelo recomienda atrasar la siembra cinco días en años F y N, mientras que en años C sugiere un retraso de 16 días respecto a la FST. Para papa sugiere un retraso de un día en años F y de 12 días en años N y C. Esta información combinada con la mostrada en las figuras anteriores representa la mejor opción para la toma de decisiones en el establecimiento de los cultivos.

Cuadro 4 6. Comparación de fecha de siembra tradicional (FST) con fechas de siembra estimadas con AquaCrop (día-juliano) para los principales cultivos ciclo otoño-invierno (OI) del DR075.

Escenario	Maíz				Frijol				Papa			
	FST	FSR	DIF	Y_x	FST	FSR	DIF	Y_x	FST	FSR	DIF	Y_x
F	317	298	-19	18.7	293	298	5	3.7	297	298	1	44.4
N	317	298	-19	18.5	293	309	16	3.6	297	309	12	43.2
C	317	288	-29	18.4	293	309	16	3.6	297	319	22	41.2

FST: fecha de siembra tradicional; FSR: fecha de siembra para máximo rendimiento; DIF: diferencia entre fechas (días), Y_x : rendimiento máximo en la fecha recomendada ($t\ ha^{-1}$).

Un análisis comparativo para estimar la brecha de rendimiento actual de los tres cultivos en los tres escenarios climáticos, se presenta en la Figura 4.6, considerando un manejo convencional (riego por gravedad y FST) y el rendimiento máximo obtenido con AquaCrop en las fechas óptimas de siembra. Se observa que el frijol tiene un potencial de incrementar su rendimiento hasta en 85% en un escenario F y de 80% en los otros escenarios, respecto al rendimiento comercial ($2\ t\ ha^{-1}$) para la zona. Para maíz tomando como referencia un rendimiento comercial de $13.5\ t\ ha^{-1}$, el máximo incremento potencial se presenta en un escenario F con 39%, seguido de un 37% en años N y de 36% en años C. Respecto a la papa el máximo incremento lo mostró también en años F con un 27%, seguido de años N con 23% y años C con 18%, considerando un rendimiento comercial de referencia de $35\ t\ ha^{-1}$. Lo anterior indica un mayor impacto negativo por altas temperaturas en los tres cultivos como lo reportaron Ojeda-Bustamante et al. (2014).

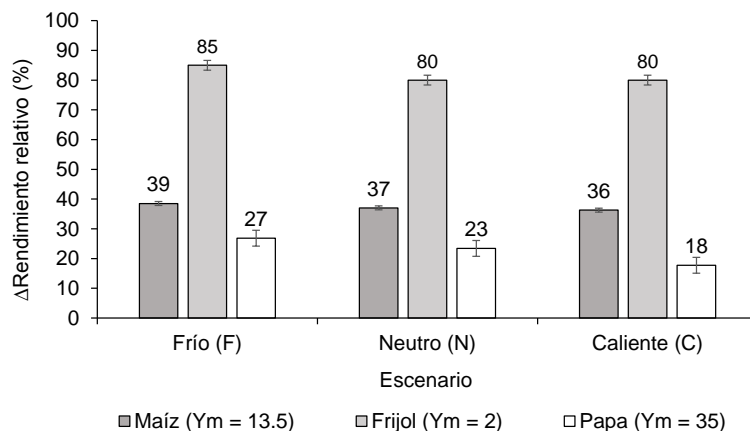


Figura 4.6. Brecha de rendimiento actual estimada (%) de los principales cultivos del DR075, respecto al rendimiento máximo (Y_x) en tres escenarios climáticos

La Figura 4.7 presenta las fechas de siembra (día-juliano) y rendimientos de 17 lotes comerciales de maíz establecidos en un área compacta ubicada en la sección 30 del módulo de riego Batequis II-3, DR075 y su posición respecto a las fechas de siembras recomendadas por el modelo AquaCrop para el tipo de año que se presentó en el ciclo OI 2018/2019 (N). Se observa en la mayoría de las parcelas que a medida que las fechas de siembra se acercan a la fecha recomendada para el año neutro el rendimiento se incrementa.

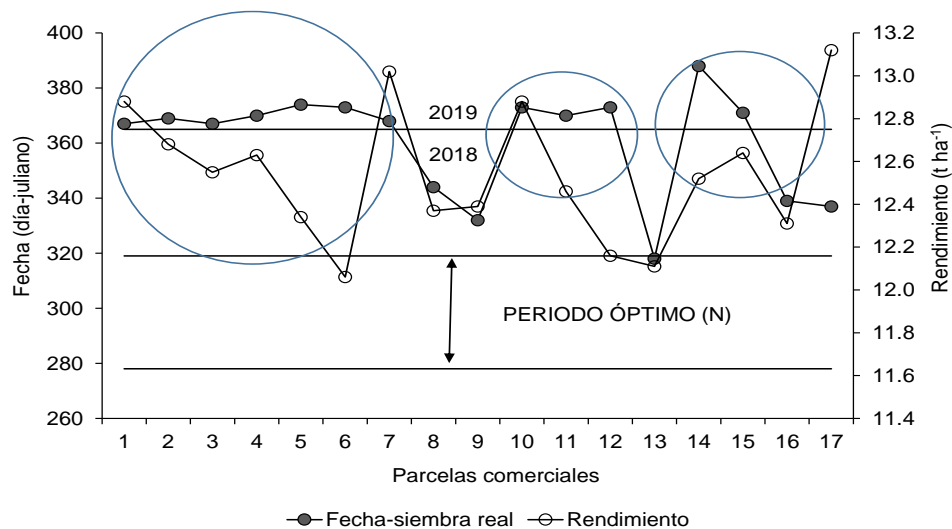


Figura 4.7. Fechas de siembra-rendimiento de 17 parcelas comerciales de maíz ciclo OI 2018-2019 y su ubicación respecto al periodo de siembra óptimo

4.4.6. Análisis operativo

La Figura 4.8 muestra la distribución de la superficie sembrada en un ciclo OI promedio sin lluvias atípicas (OI 2017/2018) y la distribución de superficie sembrada en el ciclo OI 2018/2019 donde se presentaron lluvias que obligaron a modificar los programas de siembras de los productores. En el ciclo normal se observa que la mayor superficie se establece en el periodo del DJ 320 al 330, quedando fuera de las fechas recomendadas. En el ciclo atípico cerca del 70% de la superficie de maíz se estableció la última decena de diciembre y la primera de enero. Cuando se presentan escenarios de este tipo consultar AquaCrop puede ayudar al productor a tomar la decisión de sembrar, por su parte el MR conociendo los periodos óptimos puede elaborar programas de distribución de siembras basados en estas recomendaciones que coadyuven a incrementar el rendimiento de los cultivos y a un mejor manejo de la entrega de agua en las parcelas.

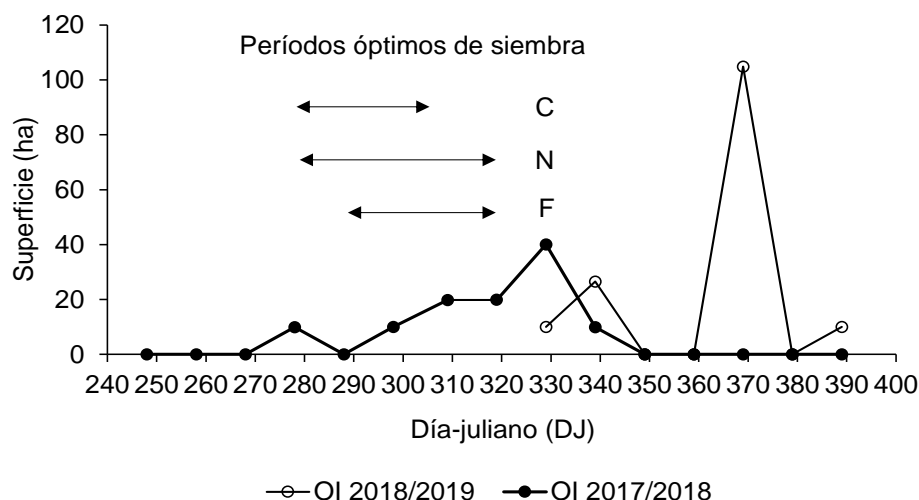


Figura 4.8. Superficie sembrada decenal de 17 parcelas de maíz en dos ciclos otoño-invierno (OI) contrastantes, y su relación con los periodos óptimos de siembra de tres escenarios climáticos en el módulo de riego Batequis II-2, DR075.

4.5. Conclusiones

El modelo AquaCrop calibrado y validado demostró ser una excelente herramienta en la simulación del rendimiento para la exploración de periodos óptimos de siembra en escenarios climáticos contrastantes. El modelo mostró también las brechas de rendimiento que existen en los tres cultivos estudiados y que bajo un manejo similar al experimental y siguiendo las recomendaciones de fechas de siembra, es posible cerrarlas, lo cual quedó de manifiesto en 17 parcelas comerciales de maíz establecidos en el MR Batequis II-3.

4.6. Referencias

- Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K. & Hegerl, G. (2013). Chapter 10 - Detection and attribution of climate change: From global to regional. *In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L.A., Valdés J.B., Arteaga-Ramírez, R. y Vázquez-Peña, M.A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tec. y Ciencias del Agua, IMTA*, 8 (1): 35-52. ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. D. R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. 303pp.
- Dourado, M.I., Bastos, L.G., de Souza, J.L., Teodoro, I., Quintela-de la Rocha, A.E., Cavalcante-Júnior, C.A., Bastos, L.G., Araújo, F.J.R., de Carvalho, A.L. & de Souza, F.R.L. (2019). Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. *AJCS* 13(07):1188-1196 (2019) ISSN:1835-2707. doi: 10.21475/ajcs.19.13.07.p1790
- Espadafor, M., Couto, L., Resende, M., Henderson, D.W., García-Vila, M. & Fereres, E. (2017). Simulation of the responses of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* ISSN 2151-0032 <https://doi.org/10.13031/trans.12386>
- Flores, G.H., Ojeda, B.W., Flores, M.H., Sifuentes, I.E. y Mejía, S.E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia* 47 (4): 347-359. 2013. Texcoco, México.
- Hernández, N., Soto, F. y Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: características y usos. Cultivos tropicales. ISSN: 0258-5936. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Cuba. 30 (1). Pp 73-82
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2017). Agenda Técnica Agrícola Sinaloa. © INIFAP. Ciudad de México, México. 209pp. Recuperado de: (https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al quinto informe de evaluación del IPCC [equipo principal de redacción: RK Pachauri y LA Meyer]. Primera edición 2015. Ginebra, Suiza. 157pp.
- Joshua, L.S., Onyando, J. & Karanja, A. (2017). Calibration and Validation of Aqua Crop for Full and Deficit Irrigation of French Bean in Njoro-Nakuru-Kenya. *International Journal of Science and Research (IJSR)* 6(11): 69-76. ISSN (Online): 2319-7064. DOI: 10.21275/ART20177751
- Linkera, R., Ioslovicha, I., Sylaiosb, G., Plauborgc, F. & Battilanid, A. (2016). Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management* 163 (2016) 236–243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.011>

- Lobato-Sánchez, R. y Altamirano-Del Carmen, M.A. (2017). Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México. *Tecnología y Ciencias del Agua. IMTA*. 8 (6): 101-116, ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J.F., Córcoles, J.I. & Domínguez, A. (2015). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. (2015): 267–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Ontiveros, C.R.E., Iñiguez, C.M. y Rojano, A.A. (2014). Proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa. In: Sinaloa y el cambio climático global; Flores-Campana LM et al. (eds), pp: 115-131. Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación y Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.
- Ruiz, C.J.A., Medina, G.G., Ramírez, D.J.L., Flores, L.H.E., Ramírez, O.G., Manríquez, O.J.D., Zarazúa, V.P., González, E.D.R., Díaz, P.G. y De la Mora, O.C. (2011). Cambio Climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Rev. Mex. de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. Núm. 2, (2011)*: 309-323. Texcoco, Edo. México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Panorama Agroalimentario 2019. Primera edición, 2019 © Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. 218pp.
- Sifuentes, I.E, y Macías, C.J. (2015). “IRRIMODEL” Programación Integral y Gestión del Riego a Través de Internet. Manual de Usuario v. 2.0. INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Valle del Fuerte. Folleto Técnico No. 42. ISBN: 978-607-0547-9. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. 39 pp.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. & Fereres, E. (2014). AquaCrop: conceptos, fundamento y funcionamiento. Capítulo 3: Respuesta del rendimiento de cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. En: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO 66. ISSN 0254-5284. Roma, Italia. Pp17-53
- Tornés, O.N., Brown, M.O., Gómez, M.Y. & Guerrero, A.A.M. (2014). Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Rev. Ciencias Técnicas Agrop.*, 25 (3): 23-30, ISSN -1010-2760, E-ISSN: 2071-0054
- Trimble. (2014). eCognition Developer. Munich, Alemania

5. BENEFICIOS OPERATIVOS Y PRODUCTIVOS DE LA ELABORACIÓN Y SEGUIMIENTO DE PLANES INTEGRALES DE RIEGO EN DISTRITOS DE RIEGO

5.1. Resumen

Las zonas de riego de México han sido las principales abastecedoras de alimentos y las que mayormente contribuyen al producto interno bruto (PIB) del sector agrícola. Sin embargo, la planeación y seguimiento del riego sigue realizándose en forma tradicional sin considerar los nuevos escenarios climáticos y operativos. Una planeación y seguimiento adecuados del servicio de riego en las grandes zonas agrícolas, deben ser prioritarios de los organismos responsables de la administración del agua para tener una gestión eficiente. La metodología que se aplica actualmente además de no considerar estos cambios, carece de precisión en las estimaciones de los requerimientos hídricos de los cultivos sobreestimado las demandas de riego, lo que induce a una operación parcial y laxa con bajas eficiencias operativas. Se ha documentado que cuando se realiza una planeación integral con un acompañamiento y seguimiento del servicio de riego se incrementa significativamente la eficiencia en el uso del agua. El objetivo del presente estudio fue comparar la metodología convencional para elaborar planes de riego, con una propuesta de planeación basada en la integración de las demandas de riego para el periodo de siembras, utilizando el concepto de Grados-día desarrollo (GDD). El estudio se realizó en el MR Batequis II-3, DR075 durante el ciclo agrícola OI 2018/2019 a nivel de módulo y en una sección piloto de 189 ha en su mayoría compuesta de maíz. A nivel de MR la metodología integral generó una menor cantidad de HR y VN totales, y menor Ln total para maíz, sin embargo recomendó mayor lámina para frijol y garbanzo para satisfacer los requerimientos hídricos. A nivel área piloto la metodología integral redujo en 2% las HR y en 8% el VN (similar que a nivel MR), mostrando alta capacidad para ajustar el seguimiento a condiciones imprevistas como el desfase de fechas de siembras por lluvias. Lo anterior promovió un incremento del 10.7% de la EA y del 2.3% del rendimiento en maíz, que podrían representar 1200 ha adicionales a las 8000 que en promedio establece el MR con una producción de 15060 toneladas. La metodología está en condiciones para su validación y posterior automatización.

Palabras clave: escenarios operativos, capacidad de adaptación, acompañamiento, eficiencia de aplicación, rendimiento.

5.2. Introducción

Las zonas de riego de México son y seguirán siendo las principales generadoras de alimentos y las mayores contribuyentes al producto interno bruto (PIB) del sector agrícola. Las más importantes por su extensión, tecnificación y generadoras de riqueza se encuentran en la región noroeste del país como el Distrito de Riego (DR) 075 “Valle del Fuerte”, en el norte del estado de Sinaloa (CONAGUA, 2018). En esta región se ha observado un incremento en la variabilidad climática afectando la duración de los ciclos fenológicos de los cultivos y de sus fases de desarrollo, provocando que el manejo tradicional del riego y otras prácticas agronómicas cada vez funcionen menos. Por otro lado, las bajas eficiencias en el manejo del agua y otros insumos, la alta vulnerabilidad a períodos de baja disponibilidad hídrica y heladas de estas regiones, ponen en riesgo su estabilidad económica y social (Ojeda-Bustamante et al., 2014).

Una planeación y seguimiento adecuados del servicio de riego deben ser prioridades de los organismos encargados de la operación de las zonas de riego para un eficiente desempeño, sin embargo, se carece de una metodología apropiada que se adapte a escenarios climáticos y operativos; la metodología que se usa actualmente a través del programa de cómputo PlanDR no considera estas variaciones y sobreestima las demandas de riego induciendo a una operación parcial y laxa con altos desperdicios de agua. (Palacios y Exebio, 2012; IMTA, 2014).

Se ha demostrado que cuando se realiza una adecuada planeación y acompañamiento del servicio de riego se incrementa significativamente la eficiencia en el uso del agua y energía. En el año agrícola OI 2012/2013 con el 43% de almacenamiento en el sistema de presas, en el módulo de riego (MR) Batequis II-3, DR075 con un volumen autorizado 30% menor al de un ciclo normal, se lograron ahorros extraordinarios de agua mediante acciones no estructurales como aprovechamiento de aguas residuales, riego deficitario basado en etapas fenológicas y ordenamiento de siembras en áreas compactas, entre otras, que les permitió no solo mantener la superficie sembrada normal sino incrementar en 20% la superficie de maíz y establecer un ciclo primavera-verano (PV) de 1500 ha (Sifuentes-Ibarra et al., 2013). Karimi et al. (2012) determinaron con el modelo SWAP (Suelo-Agua-Atmósfera-Planta) en la cuenca del río Gamasiab, Irán, que la adopción de una adecuada programación y seguimiento del riego y el mejoramiento de las eficiencias de aplicación parcelarias, incrementan la productividad del agua, reduciendo la extracción de agua subterránea y el consumo de energía hasta en un 40%.

La programación de riego basada en GDD o tiempo fisiológico (programación integral), es una tecnología que ha demostrado su aplicabilidad para generar programas de riego y seguimiento de los mismos considerando variabilidad climática a nivel parcelario debido a que este concepto asocia la acumulación de energía calórica con la fenología y requerimientos hídricos diarios (Salazar-Gutiérrez et al., 2013; Sifuentes et al., 2016; Mendoza-Pérez et al., 2019), sin embargo, aún no se ha aplicado para la elaboración y seguimiento de planes integrales en México. Íñiguez et al. (2011) aplicaron este concepto para determinar la evapotranspiración (ETc) diaria integrada de los cultivos de un DR y estimar la capacidad de canales, calculada con la tecnología de programación integral de riegos basada en el concepto grados día-desarrollo (GDD) (Ojeda-Bustamante et al. 2004; Ojeda-Bustamante et al., 2006; Sifuentes-Ibarra et al., 2015).

La tecnología de programación integral de riegos aplicada a cultivos bajo riego por gravedad combinada con la metodología para determinar los requerimientos integrados en el periodo de siembras, permiten calcular nuevos coeficientes unitarios de riego para la elaboración de planes integrales de riego bajo este concepto, ajustables a variabilidad climática y escenarios de operación. Bajo este contexto, el objetivo del presente estudio fue realizar un análisis comparativo entre los planes tradicionales de riego y los planes integrales bajo un enfoque climático y operativo, estimando ahorros potenciales de agua, productividad de cultivos y mejora del servicio de riego.

5.3. Materiales y métodos

5.3.1. Características de la zona de estudio

El estudio se realizó en el MR Batequis II-3, DR075, ubicado en la región norte del estado de Sinaloa en los 25° 05' N y -108° 38' O a una elevación promedio de 15 msnm. El clima predominante es cálido, seco estepario tipo desértico en el verano; en el invierno pasa de moderadamente frío en los meses de noviembre, diciembre y enero a templado a partir de Febrero. El MR cuenta con una superficie concesionada de poco menos 12000 ha con suelos en su mayoría arcillosos característicos de este DR. La actividad agrícola en el MR inicia desde el mes de septiembre con siembras tempranas de maíz¹ y hortalizas; finalizando en el mes de diciembre. El patrón de cultivos promedio que se establece durante un ciclo OI es representativo del distrito, compuesto por 66% de siembras de maíz, 23%, de frijol, 6% de garbanzo y papa y el resto de otras hortalizas.

¹ Estas siembras se destinan a la producción de semilla y elotes (mazorca en fase de grano lechoso-masoso)

La superficie promedio que se establece en el ciclo PV fluctúa en las 3600 ha distribuida con el 68% de sorgo, 31% de maíz y 1% de otros cultivos. El servicio de riego en este DR inicia una vez autorizado el plan de riegos por el comité hidráulico, el primer día del mes de octubre. Para suministrar el agua solicitada por los usuarios, se conduce desde la fuente de abastecimiento hasta las unidades, módulos, zonas, secciones de riego y parcelas a través de un sistema de canales con obras de control (Ojeda-Bustamante et al., 2007).

5.3.2. Escenarios de disponibilidad hídrica

Esta región se considera como vulnerable a periodos de baja disponibilidad hídrica, la variación histórica del volumen almacenado en el sistema de presas al primero de octubre de cada año se muestra en la Figura 5.1 (CONAGUA, 2019). Se observa un periodo de escasez de 10 años continuos (1995 a 2005) donde el año agrícola más crítico fue el 2003/2004 con solo el 30% de agua disponible. El más reciente periodo de escasez se tuvo después de la helada registrada en febrero del 2011, donde los almacenamientos se mantuvieron por tres ciclos (2011 a 2014) en solo el 43% de la capacidad total del sistema.

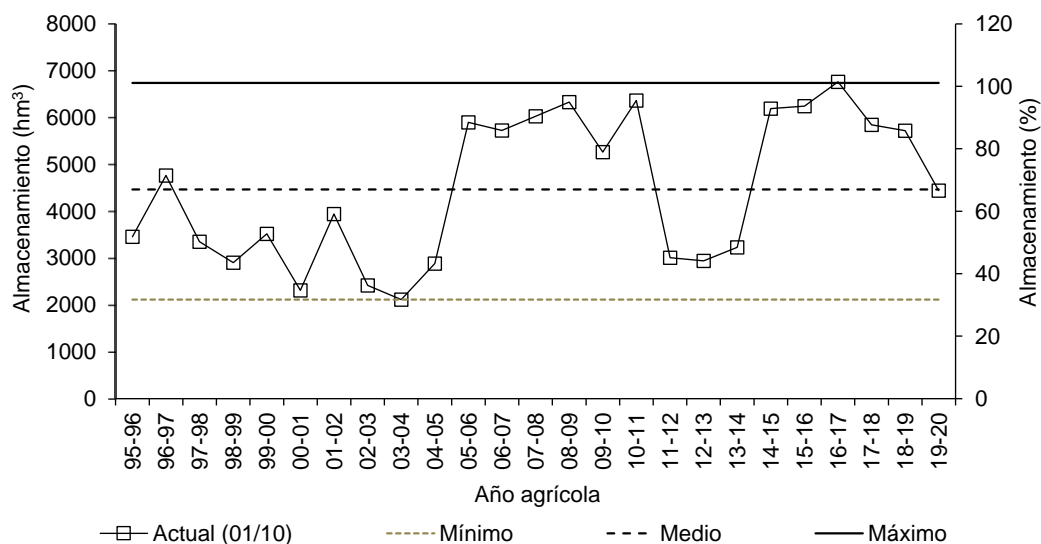


Figura 5.1. Almacenamiento histórico de agua en el sistema de presas de la cuenca del Río Fuerte, Sinaloa.

Los registros de la figura anterior permiten dividir la disponibilidad hídrica en tres tipos: 1) baja (B) del 25 al 50% de almacenamiento (1685 a 3370 hm³), 2) medio (M) con 51 al 75% de almacenamiento (3437 a 5055 hm³) y 3) alto (A) con 76 al 100% (5122 a 6740 hm³).

El conocimiento de la disponibilidad hídrica previo al inicio de un año agrícola es fundamental para la elaboración y ajuste de los planes de riego, así como para el diseño e implementación de acciones no estructurales en escenarios de baja disponibilidad hídrica.

5.3.3. Plan de riegos tradicional (PRT)

El plan de riegos tradicional (PRT) se realiza mediante un balance entre los volúmenes de agua disponibles esperados en las fuentes de abastecimiento y los volúmenes demandados por los cultivos a establecer y para otros usos (Palacios-Vélez y Exebio, 2012). La selección de los cultivos a establecer o patrón de cultivos es la primera etapa para la planeación de una zona de riego y sus demandas hídricas temporales dependerán del clima, características agronómicas y manejo. Conocer los requerimientos hídricos espacial y temporalmente permitirá acoplar la disponibilidad con la demanda y capacidad del sistema de riego, evitando de esta manera estrés hídrico (Ojeda-Bustamante et al., 2007b). Los volúmenes para otros usos incluyen el agua demandada por centros de población, industria, uso pecuario y otros fuera del distrito.

Para elaborar el PRT los módulos de riego (MR) utilizan el programa de cómputo Plan-DR que genera los anexos que integran el plan de riegos de un distrito, algunos de los cuales se presentan calendarizados en forma mensual y otros en forma decenal de acuerdo a la normatividad de la CONAGUA y son: 1) programa de cultivos a establecer, 2) superficies a sembrar y regar, 3) volúmenes netos y brutos para riego y otros usos, 4) láminas netas y brutas que se aplicarán a los cultivos y 5) funcionamiento de las obras de cabeza. La información de cada anexo se calcula a partir de los coeficientes unitarios (CU) siguientes: 1) CURN (requerimiento de riego neto), 2) CUSF (superficie física), 3) CUHR (hectáreas riego) y 3) CUVN (volumen neto).

Los valores de los CU se pueden ingresar directamente al PlanDR o el mismo programa los puede calcular con la información de la superficie de cultivos por sembrar (patrón de cultivos), superficie a regar por cultivo, láminas e intervalos de riego, volúmenes para otros usos y eficiencias mensuales de conducción (IMTA, 2014). Para calcular los valores decenales y totales de cada CU, así como el gasto de riego decenal para satisfacer la demanda de agua calculada, se utilizan las ecuaciones que se muestran en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Cálculo de los coeficientes unitarios de riego (CU) para la elaboración del plan de riego tradicional (PRT) (IMTA, 2014).

Coeficientes unitarios	Significado de iniciales
<p>Ecuación (5.1): Coeficiente unitario de requerimiento neto (CURN)</p> $CURN_{decenal} = \frac{VN_{decenal}}{SR_{decenal}}; CURN_{total} = \sum_{i=1}^n CURN_{decenal} = Ln_{total}$ <p>Quando se conoce $CURN_{decenal}$, el volumen neto decenal se puede calcular como $VN_{decenal} = CURN_{decenal} \times SR_{decenal}$</p>	<p>$VN_{decenal}$ = volumen neto decenal por aplicar a nivel de toma-granja (miles de m³), $SR_{decenal}$ = superficie por regar decenal o hectáreas riego (ha) y Ln_{total} = lámina neta total del ciclo del cultivo (dm).</p>
<p>Ecuación (5.2): Coeficiente unitario de superficie física (CUSF)</p> $CUSF_{decenal} = \frac{SF_{decenal}}{SFT}; CUSF_{total} = \sum_{i=1}^n CUSF_{decenal} = 1$	<p>$SF_{decenal}$ = superficie física o por sembrar decenal del cultivo (ha) y SFT = superficie física total a establecer (ha).</p>
<p>Ecuación (5.3): Coeficiente unitario de hectáreas riego (CUHR)</p> $CUHR_{decenal} = NRA_{decena}; CUHR_{total} = \sum_{i=1}^n CUHR_{decenal} = NR_{totales}$ <p>Quando se conoce $CUHR_{decena}$ la distribución decenal de hectáreas riego se calcula como $HR_{decena} = CUHR_{decenal} \times SFT$.</p>	<p>NRA_{decena} = número de riegos aplicados en la decena y $NR_{totales}$ = número de riegos totales que se aplicarán al cultivo.</p>
<p>Ecuación (5.4): Coeficiente unitario de volumen neto (CUVN)</p> $CUVN_{decenal} = \frac{VN_{decenal}}{SFT}$	<p>$VN_{decenal}$ = volumen neto decenal por aplicar a nivel de toma-granja (miles de m³), SFT = superficie física total a establecer (ha).</p>
<p>Ecuación (5.5): Gasto de riego diario (Q_j)</p> $Q_j = \frac{VN_{decena}}{86400} \times 100$	<p>Gasto de riego que se debe mantener en la decena j (m³ s⁻¹)</p>

Los planes generados a nivel de módulo son acumulados para obtener los planes a nivel de unidad, SRL y DR aplicando las eficiencias de conducción de cada nivel. Una vez determinados los volúmenes brutos totales requeridos, se calcula el funcionamiento a nivel de las fuentes de abastecimiento. Un problema del PRT es que en la mayoría de las zonas de riego no se cuenta con respaldo experimental de los requerimientos (RR) e intervalos de riego (IR) de los cultivos y no se considera el efecto de la fecha de siembra y el clima, provocando que los CUVN y Q_j sean inconsistentes.

Ojeda-Bustamante et al. (2007b), documentaron una metodología para calcular la capacidad del sistema por hectárea asumiendo una operación de 24 horas y lo llamaron coeficiente unitario de riego (Q_u) (ecuación 5.6) a partir de los requerimientos de riego diarios de diseño (RR_d) (usando RR crítico e IR fijos) y la capacidad del sistema para satisfacer las demandas de riego de una zona agrícola (Q_s).

$$Q_u = K \frac{(RR_{dd})_{ZR}}{E_g} \quad (5.6)$$

Donde Q_u es el coeficiente unitario de riego [$(L s^{-1}) ha^{-1}$], K es un valor constante de 11.6 para las unidades usadas, $(RR_{dd})_{ZR}$ es el requerimiento de riego diario de diseño para la zona de riego ($mm d^{-1}$) y E_g es la eficiencia global del sistema (%/100).

5.3.4. Plan integral de riegos (PIR)

La metodología desarrollada para la elaboración del PIR es la combinación de la tecnología de programación integral de riegos basada en el concepto GDD aplicada a cultivos bajo riego por gravedad y la metodología para determinar los requerimientos integrados en el periodo de siembras de los cultivos del MR (Íñiguez et al., 2011), la cual se resume en los siguientes pasos:

1. **Selección del patrón de cultivos:** para la selección de cultivos a establecer se proponen cuatro criterios para la selección del patrón de cultivos: i) utilizar el patrón de cultivos de un ciclo con condiciones de disponibilidad hídrica similar al programado, ii) considerar la intención de siembras de los usuarios iii) usar el promedio de los últimos 5 a 10 años y iv) combinación de los dos primeros criterios.
2. **Programación de la superficie decenal por sembrar (SF):** se utilizan los registros de superficies sembradas por usuario del módulo de riego para un ciclo agrícola con condiciones similares de disponibilidad hídrica a las del ciclo a programar.
3. **Generación de calendarios de riego decenales integrales:** estos calendarios se generaron para el día intermedio de cada decena de los meses de septiembre a diciembre. mediante la metodología de programación integral del riego (Ojeda et al., 2006) utilizando la plataforma computacional IRRIMODEL© operada a través de internet (Sifuentes *et al.*, 2015) generada y validada para la zona de estudio con impactos positivos en cantidad y calidad de rendimiento en cultivos sensibles como papa (Apéndice D).

4. **Requerimientos de riego decenales integrados:** para la integración de los requerimientos de riego o láminas netas decenales (Ln_i ó $CURN_i$) se utilizó la ecuación 5.7.

$$CURN_{i\text{decenal}} = \sum_{i=1}^n Ln_{ij} \times f_{ij} \quad (5.7)$$

Donde, $CURN_{i\text{decenal}}$, son los requerimientos de riego decenales o láminas netas decenales (dm) integradas, Ln_{ij} representa la evapotranspiración del cultivo acumulada ($ET_{c\text{-acum}}$) o lámina neta para la fecha de siembra i de la decena j . La ET_c diaria se estimó con $ET_c = ET_o \times Kc \times Ks$ donde ET_o es la evapotranspiración de referencia ($mm\ d^{-1}$) calculada con el método de Penman-Monteith modificado (Allen et al., 1998), Kc es el coeficiente de cultivo diario y Ks representa al coeficiente de estrés del suelo. f_{ij} es un factor de ponderación de la superficie por regar para la fecha de siembra i de la decena j y se calcula con la ecuación (5.8):

$$f_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{t-j}}, \text{ para cada decena } \sum f_{ij} = 1 \quad (5.8)$$

Donde, S_{ij} es la superficie por regar en la decena i de la fecha de siembra j y S_{t-j} la superficie total por regar para la decena j .

5. **Cálculo de coeficientes unitarios (CU):** estos coeficientes son CUSF, CUHR y CUVN y se calculan a partir de la información generada en los incisos anteriores, el procedimiento es el mismo como se explicó en la elaboración de los PRT (Cuadro 5.1).
6. **Cálculos de gastos de riego decenales:** los gastos de riego decenales para los diferentes niveles de operación del módulo de riego se calculan con la ecuación descrita en el PRT. El PIR de la zona agrícola resultará de acumular la demanda de gastos decenales de todos los cultivos que integran el patrón de cultivos.
7. **Seguimiento:** una parte fundamental de esta metodología es el seguimiento de PIR que a diferencia del PRT es posible realizar ajustes a las condiciones presentes durante el establecimiento y desarrollo de los cultivos.

5.3.5. Evaluación

La evaluación de la metodología para la elaboración y seguimiento del PIR se realizó a nivel de MR y a pequeña escala en un área piloto, durante el ciclo agrícola OI 2018/2019. El MR utilizado para la evaluación fue el Batequis II-3, DR075 donde también se estableció el área piloto (sección 30) compuesta de 22 siembras comerciales (17 de maíz y cinco de garbanzo) que en conjunto sumaron 188.8 ha (Figura 5.2).

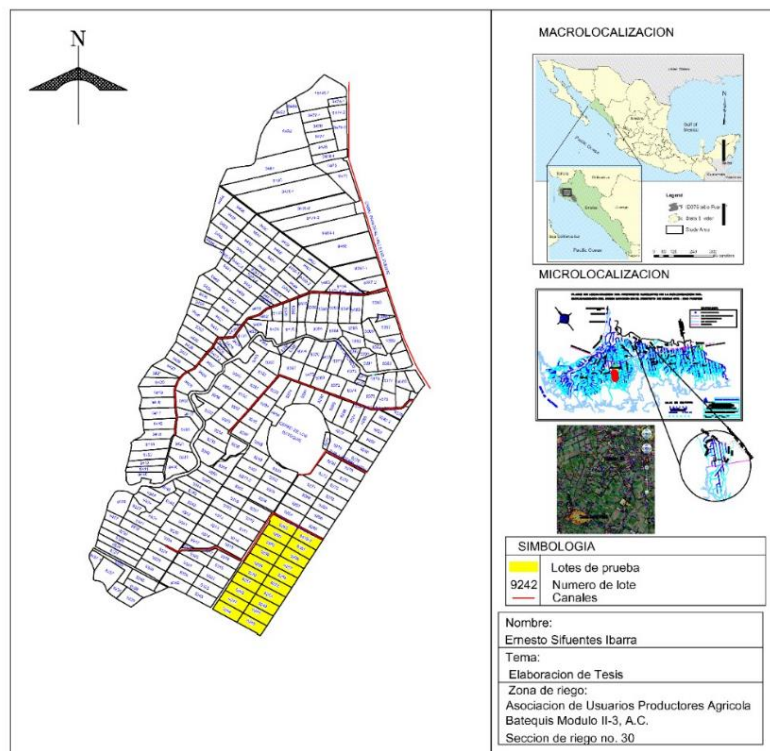


Figura 5.2. Ubicación del módulo de riego Batequis II-3, DR075 y área piloto (amarillo) para seguimiento y evaluación del plan integral de riegos (PIR).

5.3.5.1. Módulo de riego (MR)

La selección del patrón de cultivos para elaborar el PIR se hizo con el criterio de selección del patrón de cultivos de características similares al esperado o planeado; para el análisis, el patrón utilizado fue el del ciclo OI 2017/2018; el patrón de cultivos usado en el PRT se extrajo del PlanDR del MR. El Cuadro 5.2 muestra la superficie sembrada en los ciclos OI de los principales cultivos del MR y la disponibilidad hídrica en el sistema de presas del periodo 2012/2013 al 2018/2019, información extraída del sistema SPRITER (Ojeda-Bustamante et al., 2007a) que usa el MR.

Se muestra también la diferencia relativa entre la superficie establecida (OI 2018/2019) y la esperada (OI 2017/2018) (DIFREL1), así como la diferencia relativa entre la superficie establecida y la superficie promedio del periodo 2012/2013 al 2017/2018 (DIFREL2).

Cuadro 5.2. Patrón de cultivos realizados en el MR Batequis II-3, DR075 y disponibilidad hídrica presentada en el sistema de presas, en los ciclos OI 2012/2013 al 2018/2019.

No.	Ciclo OI	Disponibilidad hídrica	Frijol	Maíz	Garbanzo	Papa
1	2018-2019	Media	1860	7818	332	661
2	2017-2018	Alta	3532	6380	917	324
3	2016-2017	Alta	2941	7288	343	578
4	2015-2016	Alta	2181	8331	126	558
5	2014-2015	Alta	1752	8915	227	299
6	2013-2014	Baja	3231	7511	122	263
7	2012-2013	Baja	1943	9000	48	332
	Promedio (2-7)	--	2491	7892	302	431
	DIFREL1 (%)	--	-47.3	22.5	-63.8	+104.0
	DIFREL2 (%)	--	-17.9	-1.2	+3.3	+71.1

DIFREL1: diferencia relativa entre el ciclo 2017/2018 (esperado) y el ciclo 2018/2019 (realizado); DIFREL2: diferencia relativa entre el promedio del periodo 2012/2013 al 2017/2018 (esperado) y el ciclo 2018/2019 (realizado).

La distribución decenal de la superficie física sembrada (SF) en el ciclo OI 2017/2018 (esperado) para los cuatro cultivos se muestra en la Figura 5.3, adquirida también del sistema SPRITER.

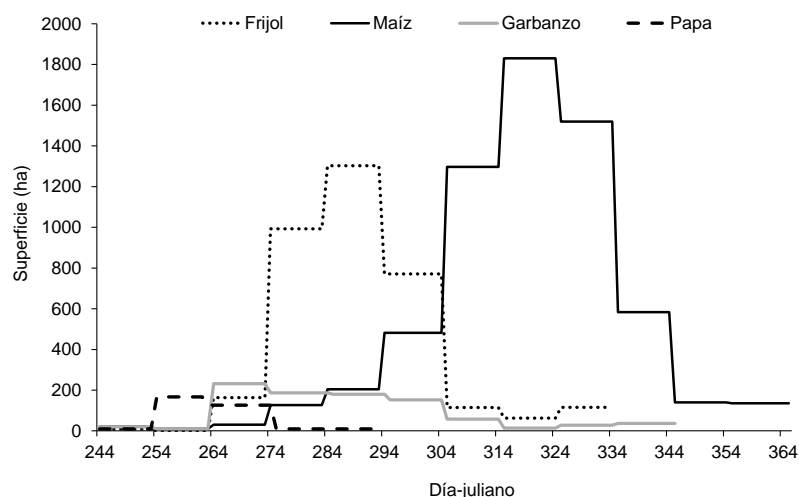


Figura 5.3. Superficie sembrada decenal de los principales cultivos OI 2017/2018 del módulo de riego Batequis II-3, DR075.

Con la información anterior y los requerimientos de riego decenales integrados se estimaron los CUSF, CUHR, CUNV para los cuatro cultivos, con los cuales se calcularon la distribución de hectáreas riego (HR), volumen neto (VN) y gastos de riego decenal (Q_j). Posteriormente se realizó una comparación de estas variables con los valores obtenidos con la metodología PlanDR o tradicional (PRT), estimando también los posibles beneficios en términos de ahorro de agua y productividad.

5.3.5.2. Área piloto

En el área piloto además de elaborar el PIR se llevó a cabo un seguimiento del mismo con el apoyo de la plataforma IRRIMODEL© (Figura 5.4).

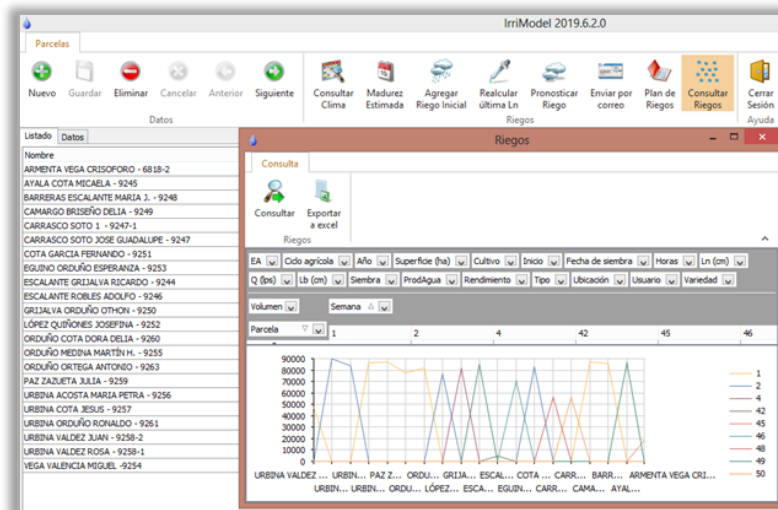


Figura 5.4. Consultas dinámicas de variables hídricas en la plataforma GDD

Para la validación de la tecnología se utilizó como testigo una sección compacta contigua a la sección piloto de características similares, pero operada en forma convencional. Para las dos metodologías se utilizó el criterio de selección del patrón de cultivos de un ciclo similar al esperado (OI 2017-2018) considerando una disponibilidad hídrica alta, quedando de la siguiente manera: 110 ha de maíz, 60 ha de frijol y 20 ha de garbanzo, sumando un total de 190 ha. La distribución de la superficie física sembrada (SF) en el ciclo OI 2017/2018 (esperado) para los tres cultivos se muestra en la Figura 5.5.

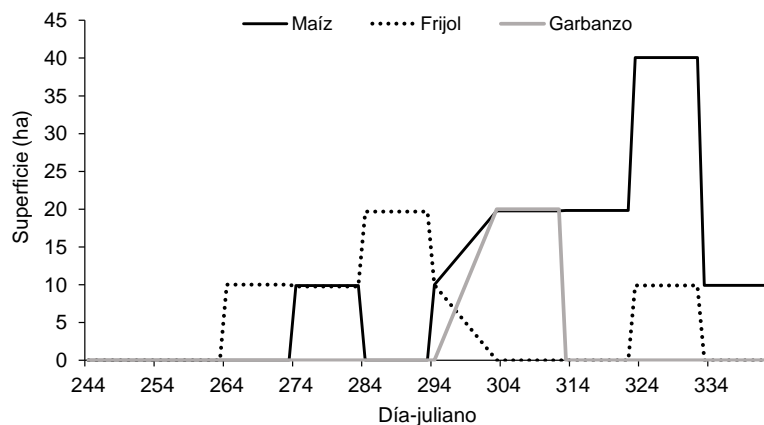


Figura 5.5. Distribución decenal de superficie sembrada en área piloto ciclo OI 2017/2018 usada para la elaboración del PIR. En el MR Batequis II-3, DR075.

Los CUSF, CUHR, CUVN y Q_j calculados con la metodología integral se compararon con los de la metodología tradicional o típica. También se determinaron eficiencias de aplicación, producción de cultivos y productividad del agua tanto en el área modelo como en la testigo.

5.4. Resultados y discusión

5.4.1. Módulo de riego

En la Figura 5.6 se presenta una comparación del comportamiento decenal de los CUSF calculados con la metodología típica (PlanDR) y con la metodología integral para los cuatro cultivos considerados (maíz, frijol, papa y garbanzo). En maíz y frijol el comportamiento de este coeficiente fue similar, con un ligero desfase y un valor máximo mayor en la metodología tradicional. En papa y garbanzo las diferencias fueron más marcadas probablemente debido a factores que alteraron la distribución de la superficie sembrada en el método tradicional, como lluvias extemporáneas o cambios de cultivo.

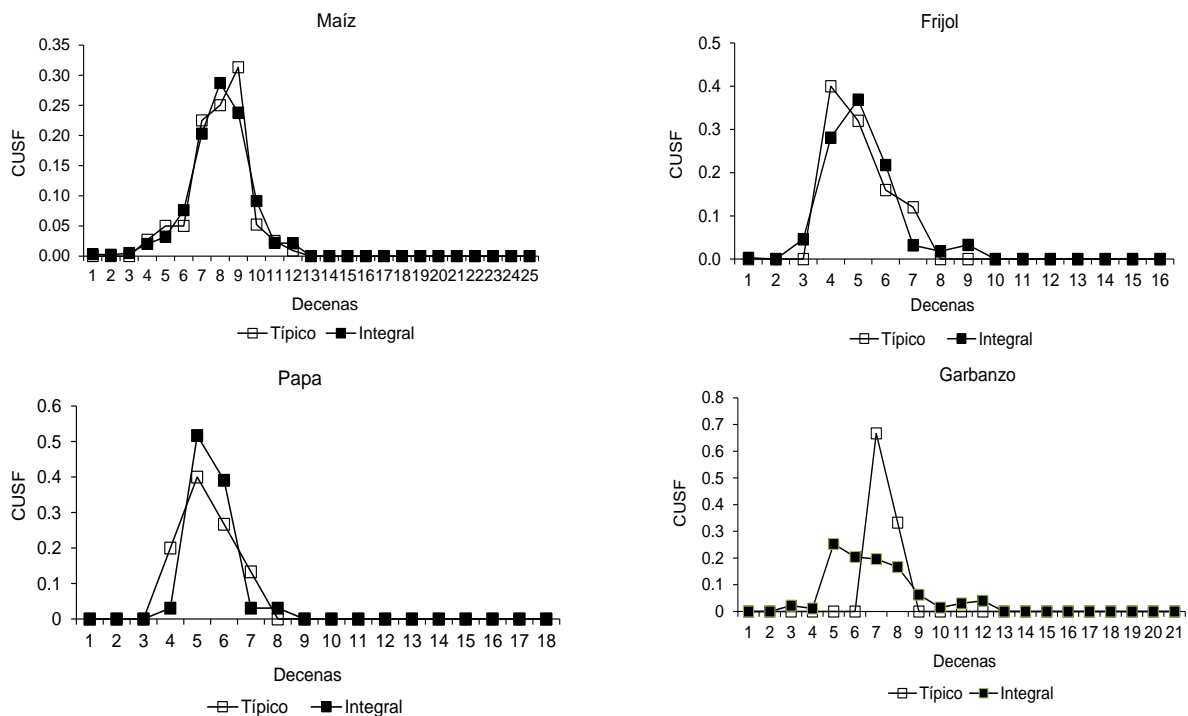


Figura 5.6. Coeficientes unitarios de superficie física (CUSF) calculados con la metodología tradicional (PlanDR) y con la metodología integral de los principales cultivos del MR Batequis II-3, DR075.

El comportamiento de los CUHR decenales se muestra en la Figura 5.7, donde a excepción de garbanzo, en los otros cultivos la curva típica es más uniforme que la curva PIR, esto como consecuencia de la variación del número e intervalos de riegos en las fechas de siembra decenales consideradas (septiembre-diciembre) en el método integral, efecto que no considera la metodología tradicional, Ojeda-Bustamante et al. (2006) encontraron una diferencia de hasta 70 días por efecto de la fecha de siembra para llegar a la etapa reproductiva de maíz afectando también los requerimientos y números de riegos en la misma zona. En el cultivo de garbanzo se observa un solo valor en la decena ocho con la metodología típica, debido a que esta solo considera aplicar un riego de germinación para el desarrollo del cultivo como se realiza localmente, mientras que con PIR considera las demandas hídricas por etapa fenológica afectadas por la fecha de siembra para maximizar rendimientos.

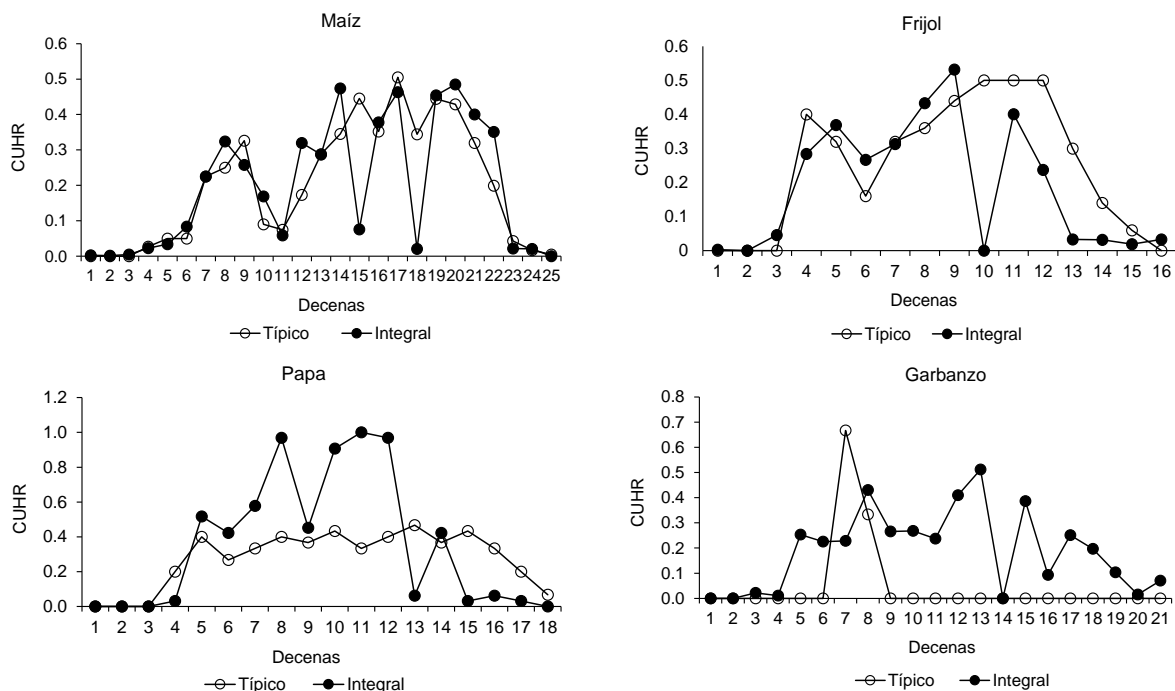


Figura 5.7. Coeficientes decenales de hectáreas riego (CUHR) típicos y calculados con la metodología típica (PIR) para cuatro cultivos del MR Batequis II-3, DR075.

Los CUVN decenales calculados con las dos metodologías se muestran en la Figura 5.8, donde los patrones de comportamiento son similares a los CUHR. También se observan momentos donde la metodología integral recomienda reducir o cancelar volúmenes de agua debido a que la demanda de riegos de las siembras tempranas finalizó, mientras que la metodología típica los mantiene constantes o por encima de lo recomendado; esta acción puede representar ahorros importantes de agua a nivel global. Por otro lado, en algunos momentos sugiere mayor volumen para abastecer las demandas hídricas de los cultivos, que de no atenderse causarían reducción importante del rendimiento.

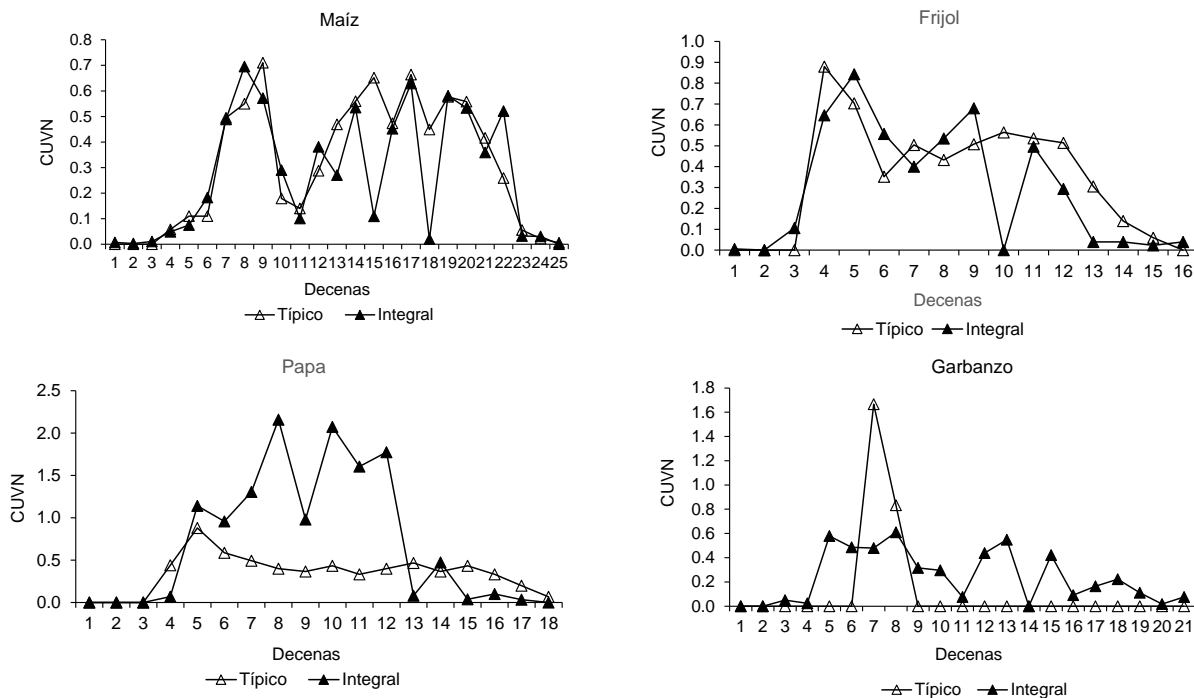


Figura 5.8. Coeficientes decenales de volumen neto (CUVN) típicos y calculados con la metodología integral (PIR) para cuatro cultivos del MR Batequis II-3, DR075.

La integración de volúmenes netos decenales de los cuatro cultivos a nivel MR con las dos metodologías, generó los gastos de riego y volúmenes decenales que se muestran en la Figura 5.9 (a) y 5.9 (b), donde se observa un patrón similar entre ambas metodologías de la primera a la décima decena, mientras que de la 13 a la 18 los gastos y volúmenes demandados fueron menores con la metodología integral debido al término de riegos de siembras tempranas, lo cual resulta en un menor volumen de agua consumido. En la Figura 5.9 (c) se muestran los valores globales del volumen demandado por cultivo y por ciclo, donde se encontró una reducción de la demanda total de 22% con el método integral con respecto al típico, en parte debido al patrón de cultivos usado. La eficiencia de aplicación considerada para el cálculo de esta variable en el método integral fue de 60 a 70%.

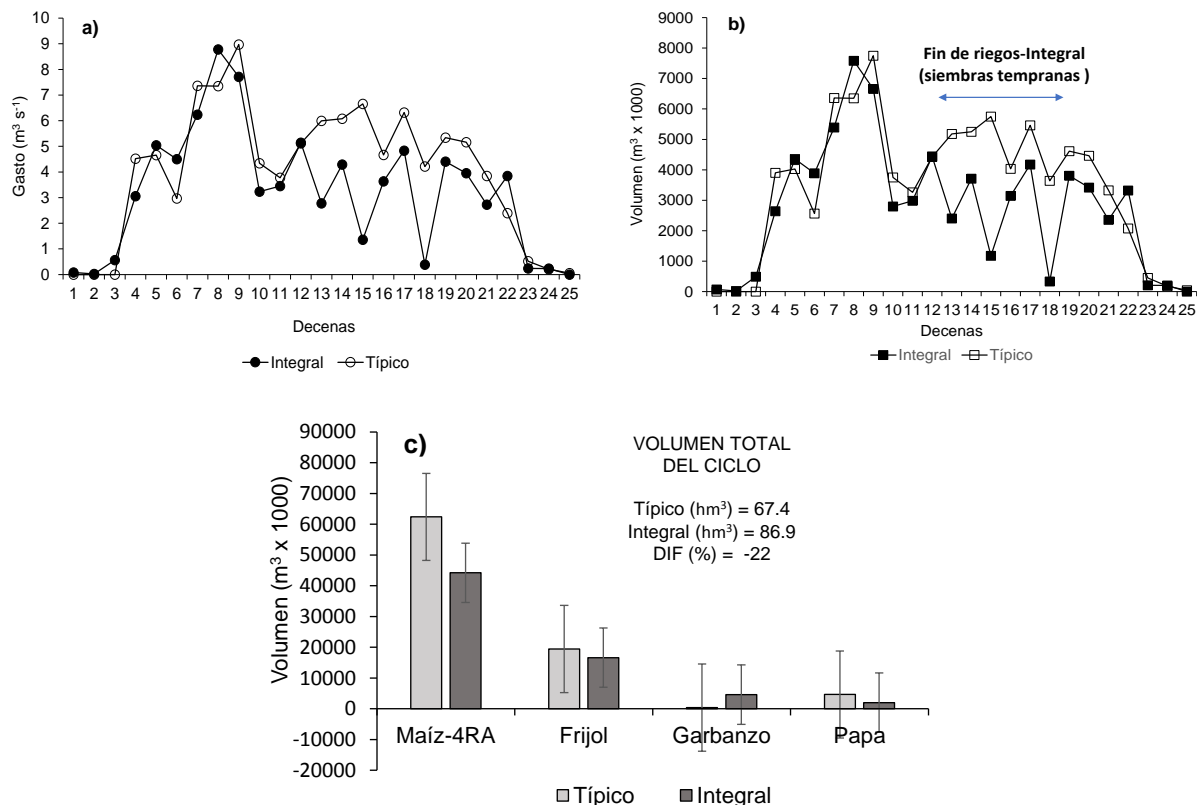


Figura 5.9. Gasto (a) y volúmenes (b) decenales demandados conjuntamente por maíz (4RA), frijol, papa y garbanzo, calculados con las metodologías típica e integral, y volumen total integrado por cultivo y por ciclo (c) estimados con las dos metodologías en el MR Batequis II-3, DR075.

Una comparación de superficies de siembra y hectáreas riego totales calculadas con las dos metodologías, contra las superficies realizadas por el MR para los cuatro cultivos, se presenta en el Cuadro 5.3. Se observa una sobre-estimación de superficie de siembra de 729 y 482 ha de la metodología típica e integral respectivamente, con respecto a la superficie real establecida en el MR. También se observa discrepancia entre las superficies por cultivo, lo cual refleja la imprecisión que todavía existe para definir los patrones de cultivo en los MR. Respecto a las hectáreas riego, también las dos metodologías superaron la superficie con respecto a las reportadas por el MR, acentuándose más en el metodología típica con una sobreestimación de 9940 ha, mientras que con la integral la diferencia fue solo de 3867 ha. En el mismo cuadro llama la atención la similitud entre la superficie autorizada y la real establecida, lo cual puede indicar que existe algún procedimiento o criterio utilizado por el MR, que no se está tomando en cuenta en la elaboración de los PR, el cual podría ser la intención de siembras reflejada en un patrón de cultivos ajustado.

Cuadro 5.3. Comparación de superficies de siembra y hectáreas riego reales y calculadas con las metodologías típica e integral de los principales cultivos ciclo OI 2018/2019 del MR Batequis II-3, DR075.

Cultivo	Superficie de siembra (ha)				Hectáreas riego (ha)		
	Autorizada	Real	Típica	Integral	Real	Típica	Integral
Frijol	2500	1860	2500	3532	3887	10000	10604
Garbanzo	200	332	150	917	160	150	3647
Maíz	7704	7818	8000	6380	37108	40000	31487
Papa	675	661	750	324	2805	3750	2089
Total:	11079	10671	11400	11153	43960	53900	47827

El Cuadro 5.4 muestra los volúmenes y láminas netos a nivel de toma parcelaria (toma-granja), calculados con la metodología típica (PlanDR) y la metodología integral, así como los valores reportados por el MR, para los cuatro cultivos analizados. Se nota una sobre-estimación del tradicional de 6307 miles de m³ con respecto a lo reportado, lo cual representa un 8.4% adicional. Por otro lado, con el método integral existe una sub-estimación de 7437 millares de m³, que representa una reducción del 9.9%, debida a la menor superficie de maíz consideradas. Los resultados de Ln muestran una reducción en frijol de 8 cm del método integral con respecto al tradicional y un incremento de 25 cm en garbanzo debido al número de riegos calculados. En maíz la reducción fue de 9 cm en el integral con respecto al típico y de 19 cm con respecto al real; en papa no hubo diferencias. Las láminas bajas de frijol y garbanzo reportadas por el MR se debieron al efecto de las lluvias de invierno.

Los resultados muestran claramente que el método integral además de reducir Ln en cultivos como maíz sin el efecto de factores externos², recomienda incrementarla en frijol y garbanzo con eficiencias de aplicación del 65% o mayores distribuyéndola de acuerdo al PIR para incrementar la productividad del cultivo.

Cuadro 5.4. Volúmenes y láminas netos (toma-granja) calculadas con la metodología PlanDR e integral y reportados en el ciclo OI 2018/2019, de los principales cultivos del MR Batequis II-3, DR075.

Cultivo	Volumen neto (miles de m ³)			Lámina neta (toma-granja) (cm)		
	Real	PlanDR	Integral	Real	PlanDR	Integral
Frijol	5370	13750	16629	30	55	47
Garbanzo	283	375	4589	19	25	50

² Como lluvia o como manejo tradicional que considera la aplicación solo del riego de germinación para el desarrollo del cultivo.

Cultivo	Volumen neto (miles de m ³)			Lámina neta (toma-granja) (cm)		
	Real	PlanDR	Integral	Real	PlanDR	Integral
Maíz	65188	62400	44210	83	78	69
Papa	4027	4650	2004	61	62	62
Total:	74868	81175	67431			

5.4.2. Área piloto

5.4.2.1. Comparación de coeficientes unitarios (CU)

En el Cuadro 5.5 se presentan los coeficientes unitarios acumulados de SF, HR y VN, y sus correspondientes superficies físicas (SFT), hectáreas riego (HRT) y volúmenes netos (VNT), calculados para la elaboración de los PR con la metodología típica e integral en el área piloto; en ambos casos se consideró la misma SFT para los tres cultivos para elaborar los PR. Las hectáreas riego totales (HRT) fueron menores en la metodología integral en maíz y frijol, mientras que en garbanzo fue cuatro veces mayor debido a que se recomendaron la aplicación de tres riegos de auxilio, reflejándose en los CUVN.

En términos globales las HRT calculadas con el método integral fue menor 1.85% que la metodología típica o tradicional; por su parte VNT presentó también reducción con un valor de 7.84%, tendencias similares a las encontradas a nivel MR.

Cuadro 5.5. Coeficientes unitarios acumulados y sus correspondientes superficie física, hectáreas riego y volúmenes netos para maíz, frijol y garbanzo, calculados con la metodología típica (PlanDR) e integral en área modelo del MR Batequis II-3, DR075.

Método	Cultivo	CUSF		CUHR		CUVN	
		ACUM	SFT	ACUM	HRT	ACUM	VNT
Integral	Maíz	1	110.0	4.9	537	7.4	807
	Frijol	1	60.0	3.0	178	4.7	279
	Garbanzo	1	20.0	4.0	80	2.7	55
Sub-total			190.0	11.9	795	14.8	1141
Típica	Maíz	1	110.0	5.0	550	7.8	858
	Frijol	1	60.0	4.0	240	5.5	330
	Garbanzo	1	20.0	1.0	20	2.5	50
Sub-total			190.0	10.0	810	15.8	1238
DIFREL (%):		0	0.00	+19.00	-1.85	-6.33	-7.84

CUSF = coeficiente unitario de superficie física, CUHR = coeficiente unitario de hectáreas riego, CUVN = coeficiente unitario de volumen neto, ACUM = valor acumulado, SFT = superficie física total programada (ha), HRT = hectáreas riego totales programadas, VNT = volumen neto total programado (miles de m³).

5.4.2.2. Seguimiento del plan integral

El principal problema para cumplir con los planes de riego son los cambios imprevistos que alteran el PR inicial y la falta de capacidad de reacción de MR para adaptarse a estos. En la zona de estudio desde el mes de junio de 2018 previo al inicio de ciclo agrícola OI 2018/2019, se presentó un periodo de lluvias extraordinarias (01/06 al 30/11) que acumularon 563 mm provocando inundaciones y el desfase de fechas de siembras de maíz, frijol y papa (Figura 5.10).

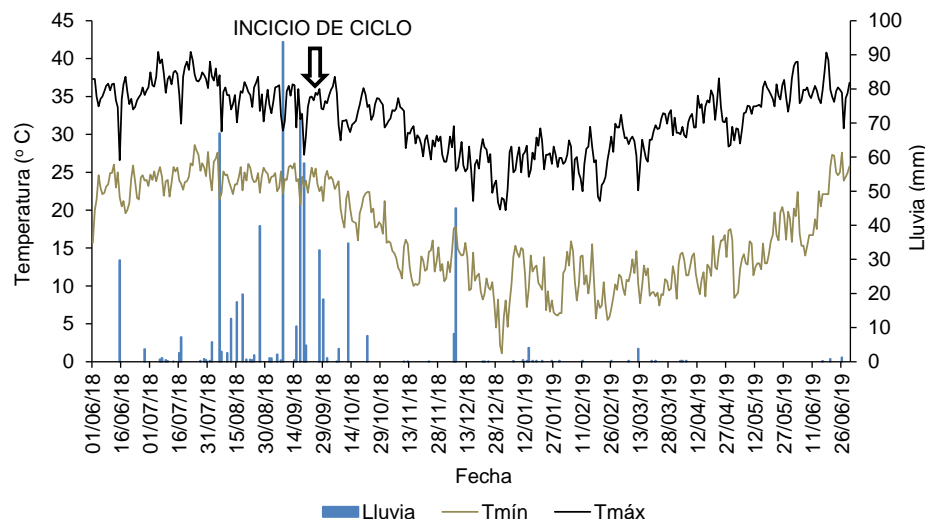


Figura 5.10. Escenario climático presente durante el ciclo de evaluación OI 2018/2019

En el ciclo de evaluación se establecieron 17 parcelas de maíz y cinco de garbanzo con una superficie total de 155 y 42 ha respectivamente. La Figura 5.11 muestra la distribución de superficies de siembra planeadas con las dos metodologías y la superficie real establecida, observándose un desfase total por efecto de la lluvia. La superficie establecida en octubre y noviembre corresponde a una parcela de maíz y cinco de garbanzo, el resto son de maíz establecidas mayormente a finales de diciembre y principios de enero.

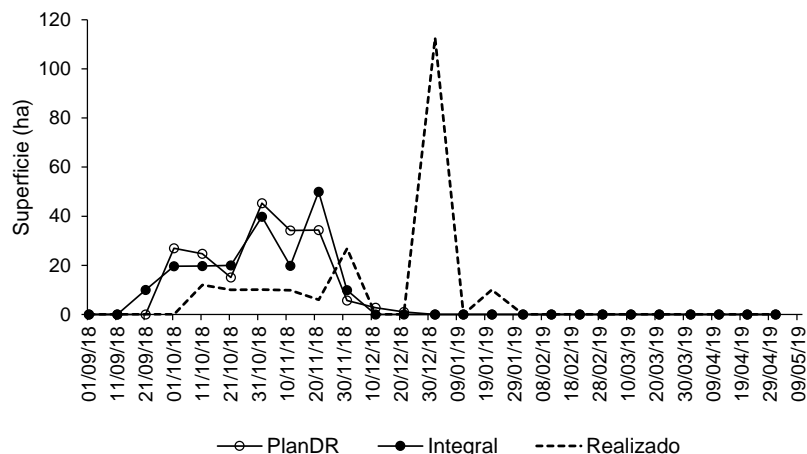


Figura 5.11. Distribución de superficies de siembra planeadas y efecto de lluvia en superficie real sembrada en sección modelo.

La Figura 5.12 muestra la proyección de hectáreas riego a partir del establecimiento del total de las parcelas generado con la plataforma IRRIMODEL© (arriba), donde también se puede observar las hectáreas riego del plan inicial calculadas con las dos metodologías, en ambos casos el desfase es evidente respecto a las proyectadas. También se muestra una comparación entre las hectáreas riego ajustadas y realizadas (abajo), donde se aprecia similitud entre ambas con un desfase de 10 días al final del ciclo.

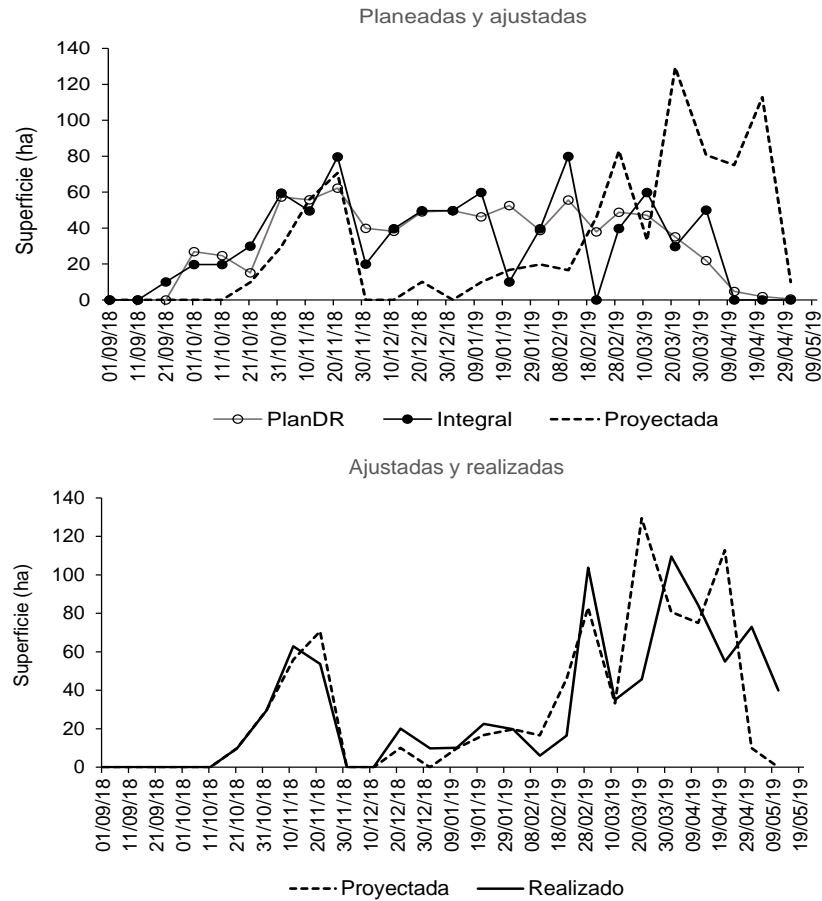


Figura 5.12. Hectáreas riego planeadas (típica e integral) y proyectadas con la plataforma GDD a partir de un escenario de desfase (arriba). Hectáreas riego proyectadas y realizadas (abajo) en área piloto.

El mismo patrón se presentó en los volúmenes y gasto de riego decenales como se muestra en la Figura 5.13. Los valores menores de los proyectados se debieron a una EA mayor, considerada en la proyección.

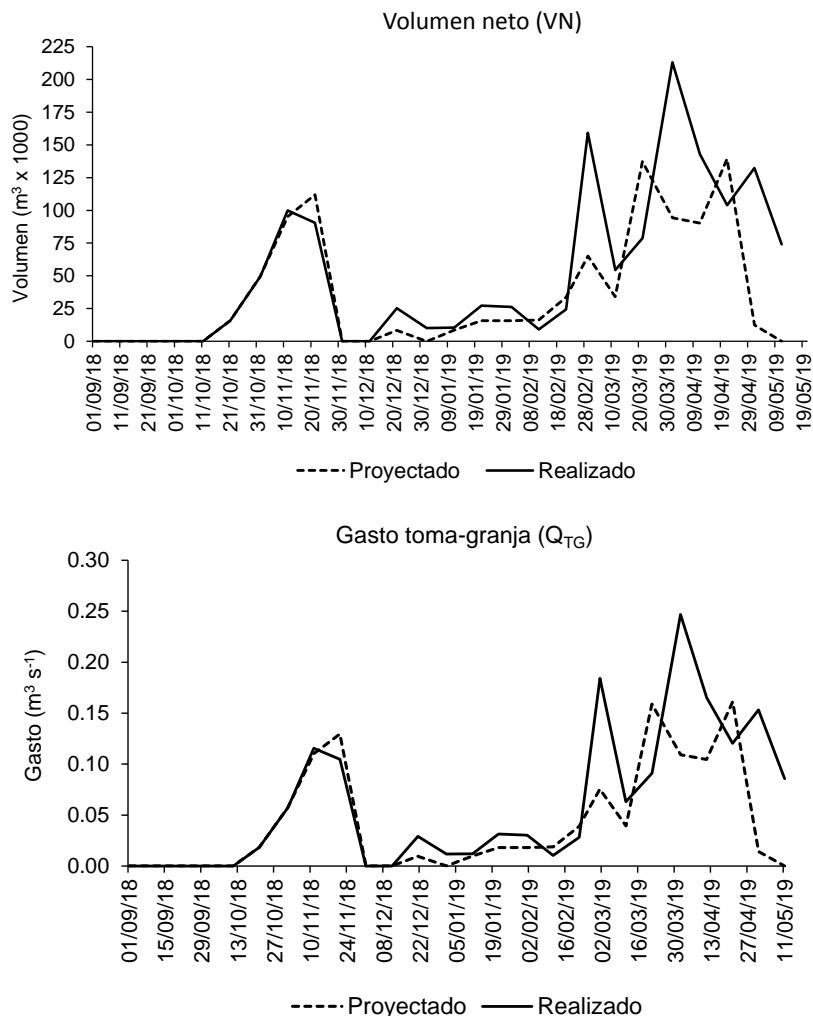


Figura 5.13. Volumen (arriba) y gasto neto (abajo) proyectados (a partir de un escenario de desfase) y realizados en área piloto del módulo de riego Batequis II-3, DR075.

La Figura 5.14 representa el comportamiento de la EA y su relación con L_n y L_b en parcelas de maíz de las áreas piloto (arriba) y de manejo convencional (abajo). La EA en el área piloto fue más alta que en el área convencional en la mayoría de las parcelas y su valor está relacionado con la diferencia entre L_b y L_n , a mayor diferencia, menor EA.

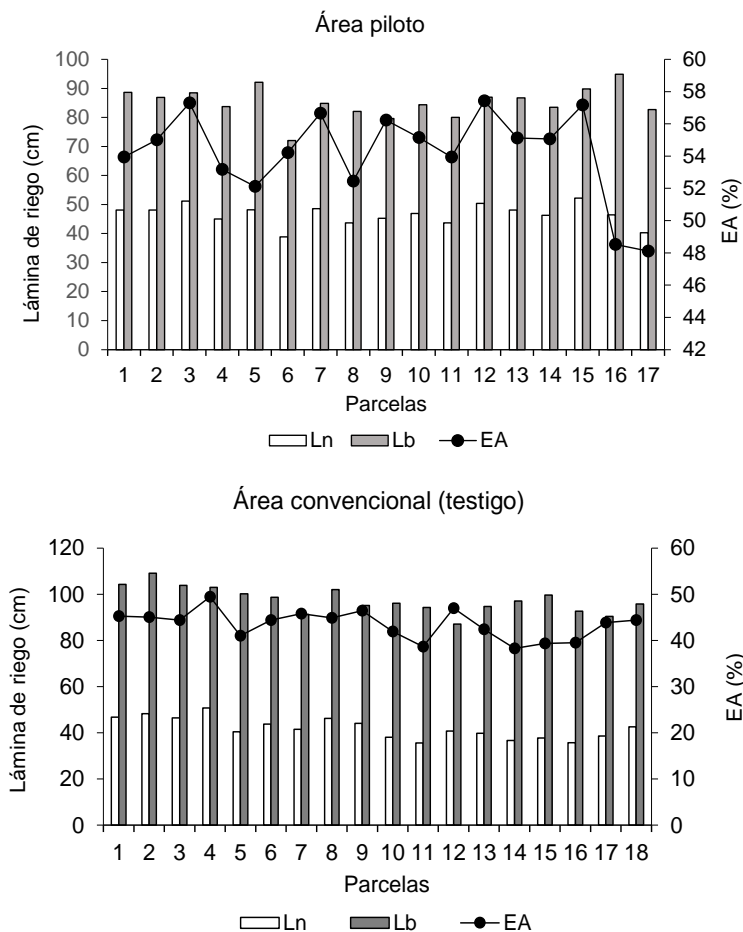


Figura 5.14. Lámina neta (Ln) y lámina bruta (Lb) de parcelas de maíz y su relación con la eficiencia de aplicación (EA) en áreas piloto (arriba) y área con manejo convencional (abajo).

El Cuadro 5.6 muestra un resumen comparativo entre variables medidas en área piloto y área con manejo convencional. Se obtuvo una reducción del 9.9% (4.6 cm) de Lb en área piloto con respecto al área con manejo convencional, representando un ahorro de $1240 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; con este volumen es posible establecer 0.15 ha adicionales por cada hectárea sembrada. Considerando una superficie de 8000 ha de maíz en el MR Batequis, sería posible establecer 1200 ha adicionales donde se podrían producir 15060 toneladas, considerando el rendimiento obtenido (Ya) en el área piloto (12.55 t ha^{-1}). Con un precio de mercado de \$4200 por tonelada (AARFS, 2020), la producción adicional representa una derrama económica de casi 64 mdp a nivel de módulo de riego. Las variables EA, Ya y PA en el área piloto tuvieron un incremento de 19.7, 2.3 y 14.5% con respecto al manejo convencional.

Cuadro 5.6. Comparación de variables medidas en áreas piloto y convencional, durante el seguimiento del plan integral de riegos en maíz.

Tipo	Ln (cm)	Lb (cm)	EA (%)	Ya (kg ha ⁻¹)	PA (kg m ⁻³)
Área piloto	46.5	85.1	54.2	12549.4	1.47
Convencional	41.9	97.5	43.5	12259.1	1.26
DIFABS	+4.6	-12.4	+10.7	+290.3	+0.21
DIFREL (%)	+9.9	-14.6	+19.7	+2.3	+14.3

Ln: lámina neta total (requerimiento de riego), Lb: lámina bruta (aplicada), EA: eficiencia de aplicación, Ya: rendimiento medido, PA = productividad del agua, DIFABS: diferencia absoluta, DIFREL: diferencia relativa.

5.5. Conclusiones

La metodología para elaboración de planes de riego mostró practicidad para aplicarla bajo riego por gravedad apoyada con la plataforma GDD. La selección del patrón de cultivos mediante los criterios combinados del patrón de cultivos promedio y la intención de siembras del productor resultó ser el más preciso. Los CUSF decenales tanto a nivel módulo como a nivel de área piloto mostraron similitud entre la metodología tradicional y la integral. Los CUHR, CIVN y gastos de riego decenales presentaron diferencias importantes entre las dos metodologías debido al efecto de la fecha de siembra considerada en el método integral. La metodología integral generó una menor cantidad de HR y VN totales, y menor Ln total para maíz, sin embargo recomendó mayor lámina para frijol y garbanzo para satisfacer los requerimientos hídricos, lo cual no sucede con la metodología tradicional. A nivel área piloto la metodología propuesta redujo en 2% las HR y en 8% el VN, mostrando alta capacidad para ajustar el seguimiento a condiciones imprevistas como el desfase de fechas de siembras por lluvias. Lo anterior promovió un incremento del 10.7% de la EA y del 2.3% del rendimiento en maíz, que podrían representar 1200 ha adicionales a las 8000 que en promedio establece el MR con una producción de 15060 toneladas. La metodología está en condiciones para su validación y posterior automatización.

5.6. Referencias

Asociación de Agricultores del Río Fuerte Sur (AARFS). (2020). Reportes de mercado internacional. Extraído de: <https://aarfs.org/reportes-de-mercado/> [consultado: 14/08/2020]
Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Food and

- Agriculture Organization of the United Nations, FAO. Rome. Documento en línea. <http://www.fao.org/docrep/>. [consultado:17/06/2019].
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. D. R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. 303pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). Sistema Nacional de Información del Agua Monitoreo de las Principales Presas de México. Extraído de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/almacenamientoPresas.php>
- IMTA-CONAGUA-SEMARNAT. (2014). Sistema para el cálculo de planes de riego (Plan-DR v3), manual de usuario. Jitepec, Morelos, México.127pp
- Íñiguez, C.M., Ojeda, B.W. y Rojano, A.A. (2011). Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) UNCOYO. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665. 43(2): 175-191.*
- Karimi, P., Sarwar-Qureshi, A, Bahramlooc, R. & Molden, D. 2012. Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. *Agricultural Water Management 108 (2012) 52– 60.* doi:10.1016/j.agwat.2011.09.001
- Mendoza-Pérez, C, Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Quevedo-Nolasco, A., Flores-Magdaleno, H., Ramírez-Ayala, C. y Ascencio-Hernández, R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante atmómetro con fines de calendarización de riego. *Idesia (Arica), 37(4), 65–72.* <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019000400065>
- Migliaccio, K.W., Morgan, K.T., Vellidis, G., Zotarelli, L., Fraisse, C., Zurweller, B.A., Andreis, J.H., Crane, J.H. & Rowland, D.L. (2016). A Smartphone apps for irrigation scheduling. ©2016 ASABE, Vol. 59 (1): 291-301. ISSN 2151-0032 DOI 10.13031/trans.59.11158 291
- Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E., Slack, D.C. & Carrillo, M. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage. 53:521-261.* USA.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., y Unland-Weiss H. (2006). Programación intergral del riego en Maíz en el Norte de Sinaloa, México. *Agrociencia, 40(1), 13–25.*
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J.M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E. & Rendón-Pimentel L. (2007a). Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agr Water Manage 89: 81-88.*
- Ojeda-Bustamante, W., Hernández-Barrios, L., & Sánchez-Cohen, I. (2007b). Requerimientos de riego de los cultivos. *En Manual para diseño de obras pequeñas de riego (2.ª ed.), Editores: De León Mojarro y Braulio D. Robles Rubio.* Jiutepec, Morelos. pp. 15–44)
- Palacios-Vélez, E. y Exebio-García, A. (2012). La operación de los sistemas de riego con apoyo de las técnicas de la información. *Colegio de Postgraduados, Biblioteca Básica de Agricultura, ISBN: 9786077150886.* Montecillo (Texcoco). 311 p
- Salazar-Gutierrez, M.R., Johnson, J., Chaves-Córdoba, B. & Hoogenbooma, G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *International Journal of*

Plant Production (2013) 7(4): 741-762, ISSN: 1735-6814 (Print), 1735-8043 (Online)
www.ijpp.info

- Sifuentes, I.E., Macías, C.J., Ojeda, B.W., Soto, F.J., Mendoza, P.C., Talamantes, C.I. y Ruelas, I. R. (2013). Estrategia integral para el uso eficiente del agua en módulos de riego del Distrito 075, Río Fuerte, Sinaloa. En: CD memorias del XVII Congreso Nacional de Irrigación. Puerto Vallarta, Jalisco. Pp 1-8
- Sifuentes, I.E. y Macías, C.J. (2015). “IRRIMODEL” Programación integral y gestión del riego a través de internet, manual del usuario, versión 2.0. INIFAP-CIRNO-CEVAF. Publicación especial No. 14, noviembre de 2015, ISBN 978-607-425-911-7. Juan José Ríos, Sinaloa, México. 36 p.
- Sifuentes, E, Macías, J., Ojeda, W., González, V.M., Salinas, V.D. y Quintana, Q.J.G. (2016). Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. *Tec.y Ciencias del Agua*, 7(2): 149-168, ISSN 0187-8336. Jiutepec, Mor., México.

6. MEJORAMIENTO DEL MONITOREO DE LA FENOLOGÍA DE MAÍZ EN GRANDES ÁREAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO SERIES DE DATOS DE SENSORES REMOTOS

6.1. Resumen

Las grandes áreas de riego de México demandan acciones no estructurales para mejorar el servicio de riego, como el monitoreo de la fenología de los cultivos a nivel parcelario; sin embargo, su aplicación se ha visto limitada por los grandes volúmenes de información de campo generados, la diversidad de fechas de siembra, variación en el manejo de cultivos y la variabilidad climática. Los métodos tradicionales para el monitoreo fenológico requieren mucho tiempo y trabajo. El objetivo del presente estudio fue generar y validar una metodología práctica para monitorear la fenología del maíz (*Zea mays* L.) a partir de la relación histórica de los índices de vegetación (VIs), EVI y NDVI, con el desarrollo fenológico (DF) del maíz cultivado en grandes zonas de riego. Se utilizó una base de datos climática de 20 años de datos, desarrollo fenológico de cultivos e imágenes satelitales LANDSAT. Se propuso una metodología a gran escala apoyada con un Sistema de Información Geográfica (GIS) y series de datos de sensores remotos. La metodología se validó en 19 parcelas con una correlación aceptable entre el DF observado y el estimado para los dos VIs con valores ligeramente mejores para EVI que para NDVI. Los modelos NDVI y EVI coincidieron con las observaciones experimentales de DF en el 92.1% de las parcelas utilizadas para validar la metodología, en 2.5% solo el modelo NDVI coincidió con el real, en el 3.1% solo coincidió el modelo EVI y en 2.3% ambos modelos no coincidieron con la etapa fenológica real. Los resultados indican que es posible generalizar la metodología aplicada a grandes zonas de riego con percepción remota y el GIS.

Palabras clave: *Zea mays* L., distritos de riego, variabilidad climática, GIS, México

6.2. Introducción

En México, más de seis millones de hectáreas se riegan anualmente, lo que representa casi un tercio de la superficie agrícola cultivada donde se genera el 50% del valor total de la producción agrícola (SIAP, 2019). Las zonas de riego (ZR) mexicanas están clasificadas institucionalmente en 86 distritos de riego (DR) integrados por módulos de riego (MR) y administrados por asociaciones de usuarios productores agrícolas (AUPA) y 50735 unidades de riego (UR) que los usuarios operan de forma autónoma (CONAGUA, 2019a; CONAGUA, 2019b).

Uno de los principales problemas de estas grandes áreas es la baja eficiencia de riego (30 a 45%) a nivel de parcela, asociada con un servicio de riego deficiente por parte de las AUPA y la pobre eficiencia de conducción (Sifuentes et al., 2015). Para mejorar la eficiencia y el servicio de riego, se requiere del conocimiento detallado del desarrollo fenológico de los cultivos para acoplar mejor su demanda de agua con el desarrollo fenológico que está en constante cambio (Espinosa et al., 2017). Aunque se han realizado esfuerzos para implementar el monitoreo de la fenología de los cultivos en los DR de México, su aplicación es limitada debido a la gran cantidad de áreas irrigadas, la diversidad de cultivos y los altos volúmenes de información de campo que se manejan diariamente (Ojeda et al., 2007). En un escenario de alta competencia por recursos limitados, junto con la seguridad alimentaria y los efectos del cambio climático, el monitoreo agrícola se vuelve muy importante (Heupel et al., 2018).

El concepto Grados-Día Desarrollo (GDD) se ha utilizado durante varias décadas para estimar las etapas fenológicas del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) (Ojeda et al., 2006), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Kimball et al., 2012) y papa (*Solanum tuberosum* L.) (Flores et al., 2012), entre otros; sin embargo, su aplicación depende del conocimiento de información agronómica y ambiental precisa, como la fecha de siembra, el tipo y variedad del cultivo, la temperatura diaria del aire (T_a) y un manejo del desarrollo no restrictivo, como la ausencia de estrés hídrico, nutricional o ambiental (Roth & Yocum, 1997; Ghamghami et al., 2019; Hufkens et al., 2019).

El uso de sensores remotos para identificar y clasificar cultivos es actualmente una tarea común, utilizando sus características espectrales (Heupel et al., 2018). Sin embargo, su aplicación práctica para estimar otras variables agrícolas sigue siendo un desafío importante debido a la alta heterogeneidad y el tamaño de las parcelas cultivadas, la presencia de nubes y la resolución espacial de las imágenes (Burke & Lobell, 2017; Hufkens et al., 2019).

Los Índices de Vegetación (VIs), definidos como combinaciones matemáticas o transformaciones de dos o más bandas del espectro electromagnético para maximizar las características de la vegetación (Tsouros et al., 2019), son los productos más utilizados de la teledetección para estimar la fenología de los cultivos (Kamble et al., 2013; Zhong et al., 2014). Se ha reportado que los VIs más utilizados son el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorada (EVI) (Matsushita et al., 2007). De Bernardis et al. (2016) ajustaron las funciones de los datos de desarrollo fenológico y los valores de NDVI para predecir la fenología del arroz (*Oryza sativa* L.). Reed et al. (1994) utilizaron series históricas de NDVI obtenidas de imágenes AVHRR para predecir la fenología del trigo; Yanfei et al. (2019) utilizaron los índices EVI y NDVI para monitorear la fenología de 12 cultivos en grandes áreas reportando una precisión del 85% y 81%, respectivamente.

Los sensores remotos también permiten monitorear las condiciones reales del cultivo en el campo con una resolución espacial y temporal adecuada. Cuando los grados-día desarrollo acumulados (GDDA) se combinan con los VIs, el monitoreo fenológico mejora significativamente (Mavi y Tupper, 2004; Teal et al., 2006). Viña et al. (2004) reportaron un buen ajuste de los VIs VARIgreen, VARIred-edge (Visible Atmospherically Resistant Index) y NDVI con los GDDA y el contenido de clorofila de maíz. Los VARI fueron más sensibles que los NDVI con respecto a la fracción verde de la cubierta vegetal, mejorando la detección de la senescencia, desarrollo vegetativo y presencia de varios tipos de estrés. Liao et al. (2019) utilizaron la temperatura acumulada en los parámetros relacionados con un modelo fenológico y la información extraída de las imágenes LANDSAT-8 y MODIS para simular el crecimiento y la producción de biomasa en el maíz y la soya (*Glycine max* L.).

La serie de tiempo de imágenes satelitales LANDSAT son una alternativa para monitorear cultivos en grandes áreas agrícolas, con una resolución espacial y temporal moderada (30 m y 16 días respectivamente). Son de libre acceso con suficiente información para su uso y aplicación (NASA 2019; Ghamghami et al., 2019). Sin embargo, en México los estudios para el desarrollo de metodologías prácticas para monitorear la fenología de los cultivos son escasos. Además, el período de siembra y los genotipos de maíz han cambiado drásticamente en la última década en el noroeste de México, por lo que este tipo de herramienta para monitorear la fenología de los cultivos es una demanda recurrente.

El objetivo de este estudio fue generar y validar una metodología para monitorear el desarrollo fenológico del maíz utilizando índices de vegetación validados con datos históricos obtenidos a partir de datos meteorológicos y de campo e imágenes de satélite LANDSAT de 20 años agrícolas. Esto se hizo en el DR más grande de México, donde el maíz es el cultivo predominante.

6.3. Materiales y Métodos

6.3.1. Área de estudio

El estudio se realizó en un área de aproximadamente 20000 ha ubicada en la unión de los MR "Santa Rosa" y "Batequis" en el DR075 "Valle del Fuerte" en la región norte del estado de Sinaloa México, ubicada en las coordenadas 25 ° 45'N y -108 ° 51'W (Figura 6.1).



Figura 6.1. Ubicación del área de estudio

El DR075 es el más grande del país, con más de 260000 ha cosechadas anualmente y un valor de la producción de alrededor de 850 millones de dólares, con más de 170000 ha de maíz con rendimiento promedio de 12.7 t ha⁻¹ y un valor de producción de 400 millones de dólares estadounidenses (SIAP, 2019). El área de estudio registra una precipitación media anual de 352 mm, una temperatura media anual de 25 ° C y una altitud de 15 msnm. Los suelos son planos, profundos, sin problemas de sales y principalmente con texturas arcillosa y franco-arcillosa con humedad disponible en el rango de 0.143 a 0.155 cm³ cm⁻³ (UAS, 2014).

Treinta parcelas comerciales de maíz con un registro histórico detallado de al menos veinte años agrícolas (1998-2018) fueron seleccionadas como referencia en el área de estudio, 20 parcelas ubicadas en el MR Santa Rosa III-1 (240.8 ha) y 10 en el MR "Batequis II-3" (120 ha).

6.3.2. Análisis climático estacional

Esta árida región muestra una alta variabilidad climática, que afecta la fenología y la duración de los ciclos fenológicos de los cultivos. Para obtener más información sobre este efecto, se realizó un análisis de la variabilidad climática estacional en el desarrollo fenológico del maíz considerando una temporada de crecimiento típica del 12 de noviembre al 14 de abril del año siguiente. Este enfoque se realizó para clasificar cada estación agrícola en: Caliente (C), Neutra (N) o Fría (F), de acuerdo con la acumulación en GDD durante este período fijo de 152 días. Este corresponde a la duración en GDDA desde la siembra hasta la maduración en el área de estudio con fecha de siembra del 12 de noviembre (INIFAP, 2017). De esta manera, una estación fría se define cuando el valor acumulado de GDD en los 152 días es de 1100 a 1200, una estación neutra cuando el valor es de 1201 a 1300 GDD y para una estación cálida cuando el valor era mayor de 1300 GDDA.

6.3.3. Serie histórica de imágenes LANDSAT

Se descargaron 116 imágenes de satélite LANDSAT (5, 7 y 8) para el período de análisis (USGS, 2018) (<https://glovis.usgs.gov/>), que se corrigieron radiométricamente y atmosféricamente para mejorar tanto la posición como la calidad radiométrica, según la metodología propuesta por Chander *et al.* (2009) para LANDSAT 5 y 7 y USGS (2019) para LANDSAT 8 (OLI / TIRS) (Apéndice E). El período anual analizado fue de siete meses (noviembre a mayo), que corresponde al ciclo agrícola principal Otoño-Invierno (OI) del área de estudio, donde se reduce la presencia de nubes. La Figura 6.2 muestra el tipo y el número de imágenes LANDSAT utilizadas.

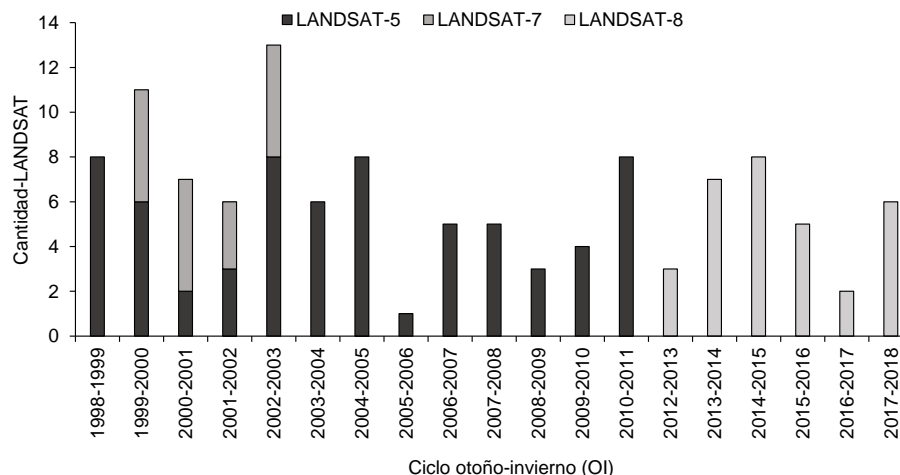


Figura 6.2. Número y tipo de imágenes LANDSAT usadas en el área de estudio

6.3.4. Relación histórica VIs-GDDA

Para analizar el comportamiento histórico VIs-GDDA, el primer paso fue estimar el valor acumulado de los GDD en cada parcela de referencia para cada imagen de satélite disponible. Los datos complementarios como fechas de siembra, cosecha, riegos, así como los datos de manejo agronómico se extrajeron del sistema SPRITER, desarrollado y aplicado por Ojeda-Bustamante et al. (2007) en la zona de estudio. Para estimar los GDDA, se utilizó una serie histórica (1998-2018) de temperatura media diaria del aire (T_a) de una estación meteorológica automatizada operada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en el centro de la zona de estudio. El cálculo de GDD se realizó utilizando la ecuación (6.1) aplicada en el área de estudio (Ojeda-Bustamante et al., 2006):

$$GDD = T_a - T_{c_{\min}}, \text{ si } T_a < T_{c_{\max}} ;$$

$$GDD = T_{c_{\max}} - T_{c_{\min}}, \text{ if } T_a \geq T_{c_{\max}} ; \tag{6.1}$$

$$GDD = 0, \text{ si } T_a \leq T_{c_{\min}}$$

Donde, GDD son los grados-día desarrollo diarios ($^{\circ}\text{C día}^{-1}$), T_a es la temperatura diaria promedio del aire calculada a partir de registros de 15 minutos ($^{\circ}\text{C}$), $T_{c_{\max}}$ es la temperatura máxima crítica del cultivo de maíz (30°C) y $T_{c_{\min}}$ es la temperatura crítica mínima del cultivo de maíz (10°C). Con los valores de GDDA, se estimó el desarrollo fenológico (DF) como una relación de desarrollo utilizando la ecuación (6.2):

$$PD = \frac{GDDA_{ID}}{GDDA_{Madurez}} \quad (6.2)$$

Donde, $GDDA_{ID}$ son los GDD acumulados desde la siembra hasta la fecha de interés ($^{\circ}$ C) y $GDD_{Madurez}$ son los GDD acumulados desde la fecha de siembra hasta la madurez fisiológica del cultivo (1451 GDDA) ($^{\circ}$ C). Después de esto, utilizando las herramientas de cálculo “raster” y “cálculo de estadísticas de área” del Software QGIS (<https://www.qgis.org>), se calcularon los promedios de los VIs para cada parcela de referencia en cada fecha de imagen para asociarse con los GDDA. Las expresiones para el cálculo de los VIs utilizados fueron las indicadas por Rouse et al. (1974) para el NDVI (ecuación 6.3) y por Huete et al. (2002) para el EVI (ecuación 6.4).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (6.3)$$

$$EVI = 2.5 \left[\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7.5\rho_{blue} + 1} \right] \quad (6.4)$$

Donde, ρ_{NIR} es la reflectancia promedio en la banda del infrarrojo cercano (840 a 880 nm), ρ_{red} es la reflectancia promedio en la banda roja (620 a 670 nm) y ρ_{blue} la reflectancia promedio en la banda azul (460 a 480 nm). Finalmente se realizó un análisis estadístico de ajuste entre los valores de los dos VIs con DF. El Cuadro 6.1 muestra los intervalos GDDA con sus correspondientes fases fenológicas y valores de DF para cada rango para la mayoría de los híbridos en el área de estudio, caracterización basada en la metodología reportada por Ritchie et al. (1992) y en los estudios realizados por Ojeda-Bustamante et al. (2006).

Cuadro 6.1. Fases de desarrollo, grados-día desarrollo acumulados (GDDA) y desarrollo fenológico (DF) para los híbridos de maíz más utilizados en el norte de Sinaloa, México.

Fase de desarrollo	GDDA ($^{\circ}$ C)	DF (%/100)
1-2 hojas (V1-V2)	200-300	0.14-0.21
3-4 hojas (V3-V4)	300-400	0.21-0.28
4-6 hojas (V4-V6)	400-500	0.28-0.34
6-8 hojas (V6-V8)	500-600	0.34-0.41
8-11 hojas (V8-V11)	600-700	0.41-0.48
11 hojas-espiga (V11-VT)	700-800	0.48-0.55
Espiga-jilote (VT-R1)	800-900	0.55-0.62
Grano acuoso-grano lechoso (R2-R3)	900-1100	0.69-0.76

Fase de desarrollo	GDDA (° C)	DF (%/100)
Grano lechoso-grano masoso (R3-R4)	1100-1200	0.76-0.83
Grano masoso-grano dentado (R4-R5)	1200-1300	0.83-0.90
Grano dentado-madurez fisiológica (R5-R6)	1300-1400	0.90-0.96
Madurez fisiológica (R6)	1400-1500	0.96-1-03
Cosecha (H)	1600-1700	1.10-1.17

6.3.5. Enfoque metodológico

La metodología propuesta se basa en la estimación del DF en función de VIs, utilizando series históricas de imágenes de satélite LANDSAT y datos de campo fenológicos. La secuencia de pasos fue la siguiente, como se muestra también en la Figura 6.3:

1. Recopilación de datos climáticos y datos agrícolas de referencia.
2. Descarga de la serie de imágenes LANDSAT para las fechas de interés de un sitio web de sensores remotos con imágenes satelitales históricas (por ejemplo, <https://glovis.usgs.gov/>).
3. Calibración y corrección radiométrica de imágenes satelitales según la metodología descrita anteriormente.
4. Cálculo de VIs con un software para GIS para cada dato de referencia de la parcela utilizando la imagen de satélite multiespectral correspondiente (por ejemplo, QGIS).
5. Estimación del DF utilizando datos de la parcela de referencia basados en GDDA con la ecuación (6.2) y el Cuadro 6.1.
6. Estimación del DF en función de VI (Figura 6.6) usando las ecuaciones cuadráticas ajustadas (Cuadro 6.3) o usando el Cuadro 6.4. Asegurarse de ubicar DF en la zona correcta de desarrollo del cultivo, en la zona ascendente (I) si VI actual (VI_i) es mayor que el VI anterior (VI_{i-1}), en la zona descendente (II) si el VI actual (VI_i) es menor que el VI anterior (VI_{i-1}).
7. Generación de mapas con el desarrollo fenológico estimado (DF), utilizando ecuaciones cuadráticas (Cuadro 6.3) o el Cuadro 6.4 para la zona I y la zona II.

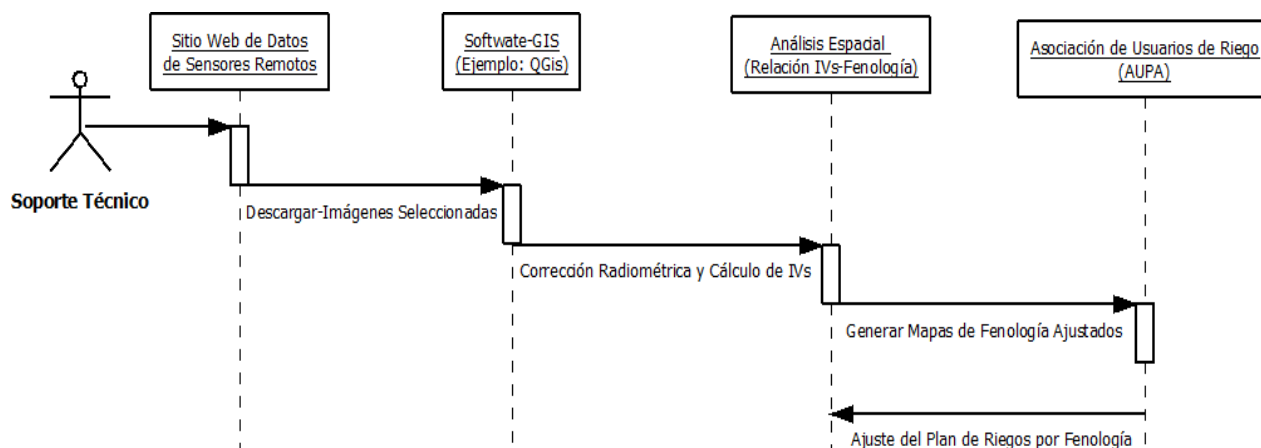


Figura 6.3. Esquema secuencial de la metodología generada

6.3.6. Validación

Para la validación de la metodología, se compararon las fases fenológicas determinadas con GDDA (desde la siembra hasta la fecha de la imagen) con las etapas observadas semanalmente en el campo. Esto se realizó para 19 de las 30 parcelas de referencia establecidas con maíz durante la temporada OI 2017/2018. La información de campo de estas parcelas también se utilizó para validar los modelos espectrales. La precisión de la metodología a gran escala se determinó en el total de parcelas de maíz en dos fechas diferentes del MR Batequis II-3, DR075 para la temporada agrícola OI 2017/2018, comparando el DF observado con el estimado por el modelo.

6.4. Resultados y discusión

6.4.1. Comportamiento histórico del desarrollo del cultivo.

La Figura 6.4 muestra el comportamiento del desarrollo histórico del cultivo de maíz en las parcelas de referencia asociadas con GDDA. Cada punto es el valor de GDDA desde la siembra hasta la fecha de la imagen. La alta variabilidad en el comportamiento de la serie está relacionada con la variabilidad climática entre años y fechas de siembra, lo cual es consistente con Ojeda et al. (2014), quienes estimaron un aumento de al menos 1.2 °C en la temperatura media anual para el norte de Sinaloa para el primer tercio de este siglo con respecto al período base (1951-2000), como resultado de un posible efecto del cambio climático. En los años F, la tendencia de la serie mostró una pendiente más baja debido al alargamiento de la temporada, en los años C la pendiente es más vertical como resultado de un acortamiento de la temporada, mientras que para ciclos N, la pendiente es intermedia.

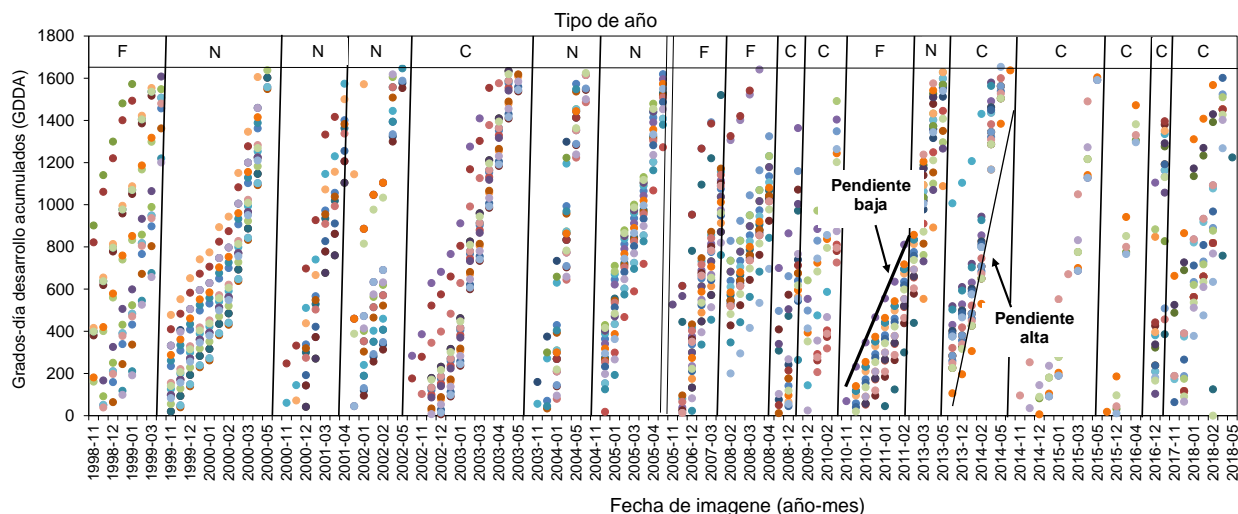


Figura 6.4. Grados-día desarrollo acumulados (GDDA) en ciclos OI para cada imagen LANDSAT en parcelas de referencia, cada siembra se muestra en un color único y el tipo de año como Frío (F), Neutro (N) y Caliente (C) en los años analizados.

El Cuadro 6.2 muestra un análisis histórico más detallado, donde se observa el efecto de la fecha de siembra y la temperatura sobre la duración del ciclo fenológico del cultivo. Para los períodos de siembra tempranos (octubre), típicos (noviembre) y tardíos (diciembre), fue posible cuantificar la variación histórica de GDDA y la temperatura media (T_m), calculada para un intervalo fijo de 152 días desde la siembra hasta la madurez fisiológica, así como el tiempo transcurrido expresado en Días Después de Siembra hasta la madurez (DDS). En los períodos de siembra temprana y tardía, se observan altos valores acumulativos de GDD debido al efecto de la alta temperatura al comienzo y al final de las temporadas de cultivo respectivamente, lo que reduce la duración del ciclo fenológica del cultivo. Por otro lado, las fechas de siembras típicas o convencionales produjeron la mayor duración del cultivo debido a las temperaturas más frías. La tendencia al calentamiento encontrada en los últimos cinco años en comparación con los 15 años agrícolas anteriores, tuvo una reducción de hasta 24 días, que representa una reducción del 13% en comparación con la duración fenológica al comienzo del período analizado, Castillo et al. (2017) también reportó este efecto. En consecuencia, existe una relación inversa entre T_m y GDDA, es decir, valores altos de T_m se relacionan con menor GDDA. La alta variabilidad inter e intra-estacional sugiere una mejora en el monitoreo de las fases fenológicas del cultivo para acoplarlas a sus demandas de agua en las grandes zonas de riego.

Cuadro 6.2. Clasificación de años [Frío (F), Neutros (N) y Calientes (H)] para indicar el efecto histórico de la temperatura en el desarrollo fenológico del maíz expresado en GDDA (° C) y duración del ciclo (DUR) en días, establecidos en tres períodos de siembra (temprana, tardía y típica) para los años agrícolas analizados.

Año agrícola	Tipo	Temprana			Tardía			Típica		
		GDDA	Tm	DUR	GDDA	Tm	DUR	GDDA	Tm	DUR
1998-1999	F	1409	19.3	158	1245	18.2	165	1150	17.6	177
1999-2000	N	1329	18.8	165	1378	19.1	157	12230	18.1	169
2000-2001	N	1326	18.8	165	1388	19.2	156	1247	18.3	168
2001-2002	N	1411	19.3	157	1456	19.6	152	1272	18.4	165
2002-2003	C	1440	19.5	154	1520	20.0	148	1384	19.1	157
2003-2004	N	1265	18.3	170	1282	18.4	163	1182	17.8	174
2004-2005	N	1479	19.8	149	1329	18.7	160	1219	18.0	172
2005-2006	N	1353	18.9	164	1459	19.6	152	1214	18.0	172
2006-2007	F	1299	18.5	167	1226	18.1	167	1151	17.6	177
2007-2008	F	1203	17.9	175	1234	18.1	168	1143	17.5	178
2008-2009	C	1474	19.7	150	1418	19.3	154	1300	18.6	165
2009-2010	C	1374	19.0	160	1374	19.0	157	1279	18.4	167
2010-2011	F	1204	17.9	175	1271	18.4	166	1142	17.5	176
2011-2012	F	1247	18.2	174	1303	18.6	162	1137	17.5	176
2012-2013	N	1240	18.2	172	1305	18.6	162	1180	17.8	176
2013-2014	C	1381	19.1	160	1384	19.1	156	1256	18.3	167
2014-2015	C	1463	19.6	151	1427	19.4	154	1300	18.6	165
2015-2016	C	1478	19.8	150	1414	19.3	154	1354	18.9	161
2016-2017	C	1591	20.5	138	1478	19.7	150	1381	19.1	158
2017-2018	C	1629	20.7	130	1528	20.1	147	1428	19.4	154
Media		1380	19.1	159	1371	19.0	158	1247	18.2	169

GDDA: calculados desde la siembra hasta 152 días DDS, Tm: temperatura promedio del aire calculada desde la siembra hasta 152 DDS (° C).

La comparación entre el desarrollo fenológico estimado con GDDA en las fechas de las imágenes y el crecimiento observado en las siembras de 19 parcelas para ciclo OI 2017-2018 se muestra en la Figura 6.5, donde se puede observar una alta correlación entre los valores observados con los estimados, con un RMSE de 0.029 correspondiente al 2.9% (4.5 días) del desarrollo total; el valor de uno corresponde a la madurez fisiológica del cultivo y valores superiores a este son parcelas cercanas a la cosecha.

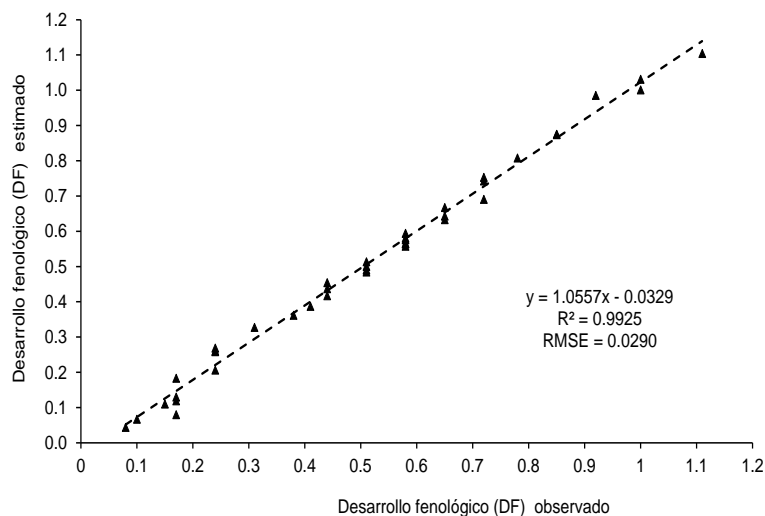


Figura 6.5. Comparación del desarrollo del cultivo estimado con GDDA en la fecha de imagen LANDSAT y el desarrollo observado en parcelas de referencia de maíz (ciclo OI 2017/2018), DF calculado como la relación entre los GDDA actuales y los GDDA a madurez fisiológica.

6.4.2. Modelos espectrales

La Figura 6.6 muestra el desarrollo fenológico (DF) como una función de los dos VIs, se observa dispersión de puntos debido a la variabilidad en el manejo del cultivo y el estrés del cultivo; Viña et al. (2004) mencionaron que el uso de VIs a través de sensores remotos hace posible detectar algunos síntomas de estrés del cultivo que la mayoría de los modelos de crecimiento y desarrollo de cultivos no reconocen. Se puede observar un mayor rango de dispersión en la zona de máximo desarrollo o zona pico en EVI (0.6-1.0) que en NDVI (0.6-0.8), probablemente debido a la mayor capacidad de EVI para la detección de parcelas estresadas en la misma fase de desarrollo de cultivos. También se observa que después del valor máximo (DF = 0.61), los valores de VIs tienen un comportamiento decreciente y son similares a los valores anteriores al DF máximo.

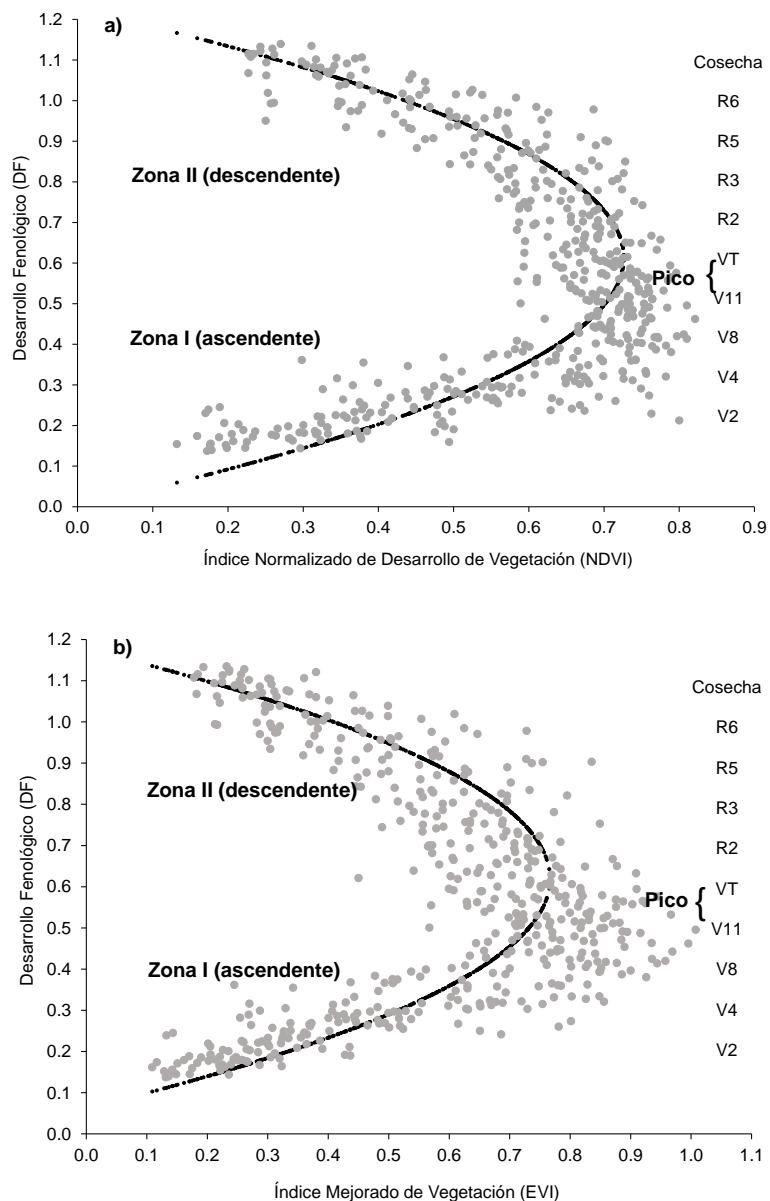


Figura 6.6. Valores históricos de NDVI (a) y EVI (b) y su relación con el desarrollo fenológico (DF) para el maíz, en el norte de Sinaloa, México.

Para expresar el DF como una función única de los VIs, la curva se dividió en dos zonas (Figura 6.6): zona I (ascendente, desde la siembra hasta el pico VI) y la zona II (descendente, desde el pico VI hasta la cosecha). El modelo ajustado para el cálculo de DF en función de VIs para las dos zonas se derivó de las raíces de ecuaciones de segundo orden (obtenidas de datos DF-VIs), donde VI corresponde a la variable independiente y el DF a la variable dependiente. Los parámetros de la ecuación para ambas zonas se indican en el Cuadro 6.3.

Cuadro 6.3. Parámetros de la ecuación tipo $DF=f(VI)=\alpha_1\pm[\alpha_2+(\alpha_3*VI)]^{0.5}$, para $VI\leq VI_{m\acute{a}x}$, de lo contrario $DF=DF_{VT}$, para estimar Desarrollo Fenológico (DF) como función de Índices de Vegetación (VIs) considerando dos zonas de desarrollo del maíz. Zona I: ecuación con signo negativo (-) para la raíz cuadrada. Zona II: ecuación con signo positivo (+) para la raíz cuadrada.

DF = f (VI)	Parámetro			VI _{máx}	DF _{VT}	R ²
	α_1	α_2	α_3			
DF _{NDVI}	0.6130	0.3740	-0.5150	0.726	0.607	0.7059
DF _{EVI}	0.6191	0.3106	-0.4052	0.767	0.616	0.6975

Otra opción para calcular DF en función de VIs es mediante un formato tabular, el Cuadro 6.4 muestra el intervalo de valores NDVI y EVI para cada intervalo de etapas fenológicas, así como los valores de DF del intervalo, obtenidos de la Figura 6.6; también se indica la zona correspondiente y los picos de VIs, estimados con el modelo ajustado. En las primeras cuatro fases, los valores de NDVI son ligeramente más altos que los de EVI, mientras que desde la quinta hasta la novena fase, los valores de EVI son mayores que los valores de NDVI; en las últimas cuatro fases EVI fue menor que NDVI. Este comportamiento también fue reportado por Yanfei et al. (2019), lo cual indica mayor sensibilidad del EVI a la alta biomasa, suelo desnudo y senescencia que el NDVI. EVI mostró una mayor respuesta con alta biomasa para DF = 0.54 (800 GDDA) y en la etapa de senescencia del cultivo desde DF = 0.69 después de 1000 GDDA.

Cuadro 6.4. Valores Mínimos y Máximos de NDVI y EVI y su relación con el Desarrollo Fenológico (DF) y fases de desarrollo del maíz, localizados en dos zonas y en el máximo punto de la curva de desarrollo, usados el monitoreo fenológico a gran escala.

Zona	NDVI		EVI		Desarrollo Fenológico	Fases de Desarrollo
	mín	máx	mín	máx		
I	0.26	0.31	0.19	0.26	0.14-0.21	V1-V2
	0.32	0.50	0.27	0.41	0.21-0.28	V3-V4
	0.51	0.60	0.42	0.57	0.28-0.34	V4-V6
	0.61	0.67	0.58	0.69	0.34-0.41	V6-V8
	0.68	0.73	0.70	0.81	0.41-0.48	V8-V11
Pico	0.74	0.74	0.82	0.82	0.48-0.55	V11-VT
II	0.69	0.73	0.73	0.81	0.55-0.62	VT-R1
	0.65	0.68	0.65	0.72	0.69-0.76	R2-R3
	0.63	0.64	0.61	0.64	0.76-0.83	R3-R4
	0.59	0.62	0.56	0.6	0.83-0.90	R4-R5
	0.51	0.58	0.50	0.55	0.90-0.96	R5-R6

Zona	NDVI		EVI		Desarrollo Fenológico	Fases de Desarrollo
	mín	máx	mín	máx		
	0.44	0.50	0.40	0.49	0.96-1-03	R6
	0.27	0.43	0.25	0.39	1.10-1.17	Cosecha

Esto también se ve en la Figura 6.7 que indica la relación de los dos índices estudiados, como lo sugieren Jensen (2007) y Huete et al. (2002). Esta figura también indica la relevancia de estimar cualquiera de los dos índices a partir del valor de uno cualquiera de estos, debido a su alto coeficiente de determinación.

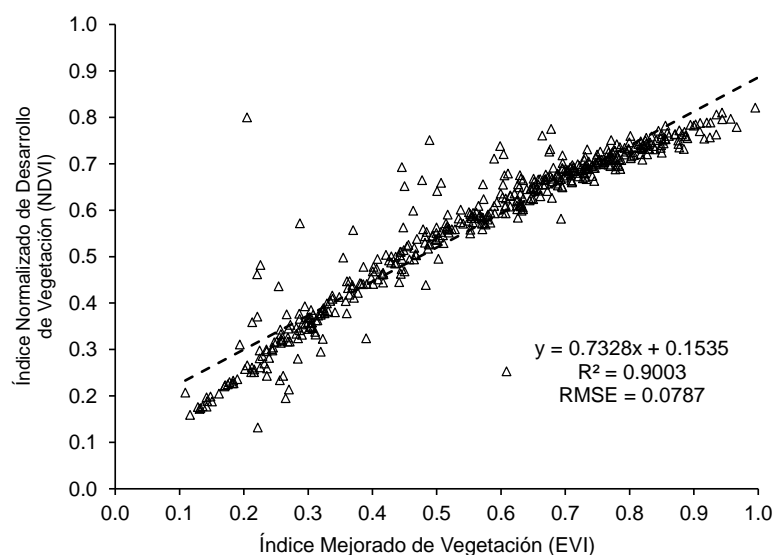


Figura 6.7. Relación EVI-NDVI utilizando datos de sensores remotos en maíz del período de 1998 a 2018 en el Distrito de Riego (DR) 075.

6.4.3. Monitoreo fenológico apoyado con GIS

Para implementar los modelos espectrales en un GIS, se generó un algoritmo, para estimar automáticamente el DF para cada parcela de maíz del módulo de riego, a partir de valores de VIs calculados a partir de imágenes de satélite multiespectrales. Para identificar la zona (Figura 6.6 y Cuadro 6.4) se generó un indicador al restar el valor de una imagen de fecha anterior (VI_{i-1}) con el VI_i actual; valores positivos corresponden a la Zona I y valores negativos corresponden a la Zona II. Se implementó un algoritmo en lenguaje Visual Basic para calcular el DF en el total de parcelas de maíz en función de los VIs, posteriormente estos resultados se incorporaron al SIG para visualizarlos espacialmente.

6.4.4. Precisión de la metodología

Los resultados de la validación de los modelos en las 19 parcelas de referencia OI 2017/2018 se calcularon utilizando los parámetros de las ecuaciones del Cuadro 6.3, mostrados en la Figura 6.8. Se encontró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9154 para el modelo NDVI y de 0.9124 para EVI, con valores RMSE de 0.1307 y 0.1219 respectivamente. Los valores indicaron precisión adecuada para ambos modelos, sin embargo, también se reflejó el efecto de la dispersión de puntos y la variabilidad espacial y temporal en las 19 parcelas distribuidas en las 20000 ha del área de estudio, principalmente cuando el valor era mayor que el valor pico estimado por el modelo. Esto influyó en la precisión para estimar la fenología como lo reportaron Burke y Lobell, (2017) y Hufkens et al. (2019).

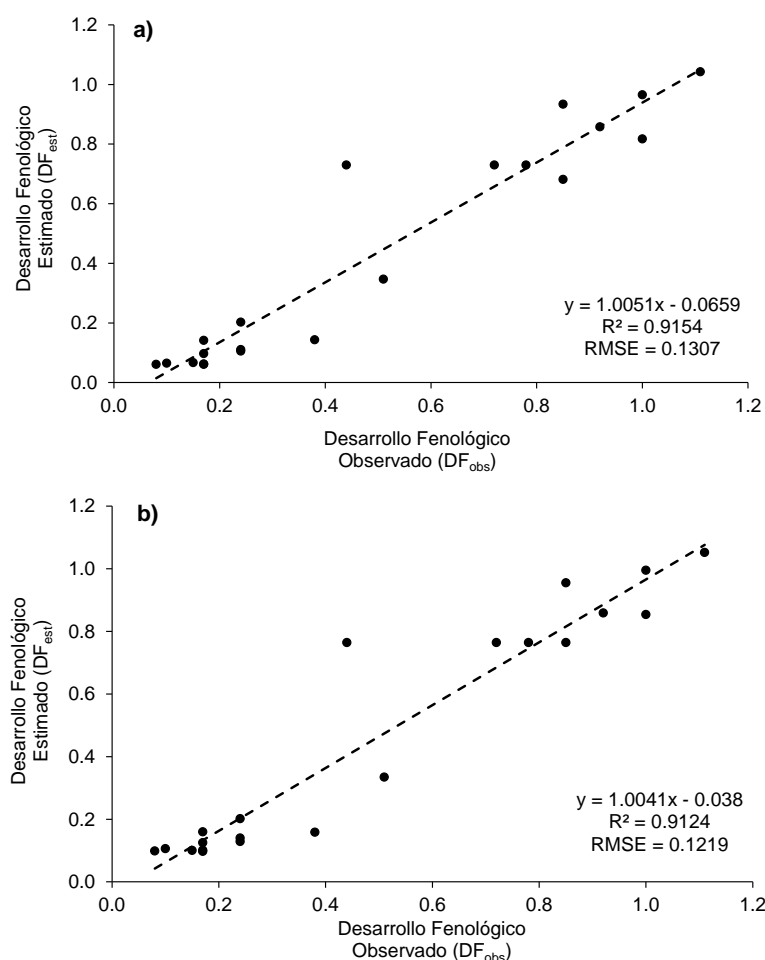


Figura 6.8. Relación del desarrollo fenológico (DF) observado y modelado en parcelas de referencia ciclo OI 2017-2018. Modelo espectral NDVI (a) y EVI (b) en el Distrito de Riego (ID) 075, al norte del estado de Sinaloa, México.

La Figura 6.9 muestran la fenología real (a) y la validación de los modelos espectrales (b) en el MR, en dos momentos contrastantes del desarrollo del cultivo (inicio y final del ciclo) generados con un GIS y usando el Cuadro 6.4 en el algoritmo. En el primer momento (11 de enero de 2018), las parcelas de maíz mayormente se encontraban en las fases V6-V8, V8-V11 y V11-VT; en un escenario de disponibilidad normal de agua, esta información es muy útil para la autorización del segundo y tercer riego por la AUR, ya que deben coincidir con las etapas V6-V8 y V11-VT, respectivamente, según lo recomendado por INIFAP (2017) y Ojeda-Bustamante et al. (2006). Bajo escenarios de disponibilidad de agua restringida, este enfoque puede tener mayor relevancia ya que el módulo de riego tiene la necesidad recurrente de optimizar el número de riegos necesarios y distribuirlos en las fases más sensibles al estrés hídrico sin afectar el rendimiento (Capítulo 2).

La validación en esta fecha indicó que en comparación con la fenología real, el 92.1% de las parcelas coincidió con la generada por ambos modelos espectrales, 2.5% con el modelo NDVI, 3.1% con el modelo EVI y 2.3% con ninguno de los modelos. En la segunda fecha (17 de abril de 2018), las fases predominantes fueron de R2-R3 a R6 y parcelas cercanas a la cosecha. Esto es importante para programar el último riego y estimar las parcelas cercanas a la madurez fenológica. La validación indicó que en comparación con la fenología real, el 86.6% de las parcelas monitoreadas coincidieron con la fenología generada por ambos modelos, 2.7% con el modelo NDVI, 1.8% con el modelo EVI y 8.9% con ninguno de los modelos. Esta disminución en la precisión de los modelos y el aumento del error con respecto a la primera fecha pueden deberse a la presencia de parcelas cosechadas, en senescencia, con malezas y al efecto de nubes, según lo reportado por Whitcraft et al. (2015).

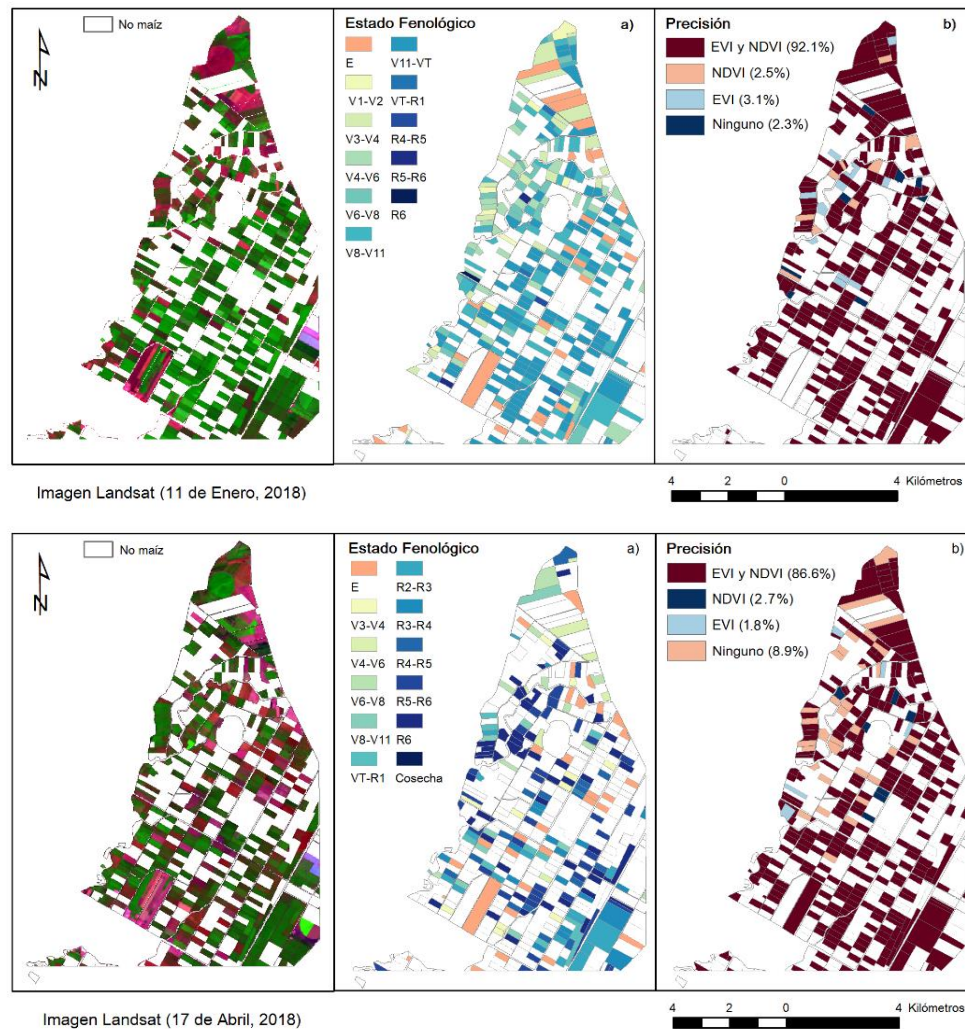


Figura 6.9. Fenología del maíz observada (a), precisión del modelo espectral utilizando NDVI y EVI (b) en dos fechas contrastantes (11 de enero y 17 de abril de 2018), en el módulo de riego Batequis II-3, DR075.

6.5. Conclusiones

La variabilidad espacio-temporal inter e intra-estacional del desarrollo fenológico del maíz justifica el uso de sensores remotos para monitorear los cultivos en grandes áreas agrícolas. El comportamiento histórico de dos VIs (NDVI y EVI) asociado con el desarrollo fenológico (DF), mostró diferencias en las etapas tempranas y tardías de desarrollo, teniendo una sensibilidad EVI mayor. Se generó un algoritmo y una metodología para monitorear la fenología del maíz a gran escala utilizando tanto datos de campo como sensores remotos integrados con el monitoreo de fenología apoyado con GIS.

La validación de la metodología en las parcelas de referencia indicó una correlación aceptable entre el DF observado y el estimada para los dos VIs con $R^2 = 0.9154$ y 0.9124 para NDVI y EVI respectivamente, y valores RMSE de 0.1307 para NDVI y 0.1219 para EVI, sin embargo, también se observó el efecto de la dispersión de puntos y la variabilidad espacial, que puede reducirse mediante el uso de áreas homogéneas. Por otro lado, la validación de la metodología a gran escala utilizando datos de campo en dos fechas contrastantes, fue más práctica y precisa debido a que el efecto de dispersión de puntos se redujo mediante el uso de intervalo de valores. Este modelo indicó que al inicio del ciclo del cultivo, la precisión para monitorear las fases fenológicas fue mayor del 92% con los dos VIs y disminuyó a 86.6% en al final del ciclo, debido a la presencia de parcelas cosechadas con suelo desnudo o en senescencia.

6.6. Referencias

- Burke, M. & Lobell, D.B. (2017). Satellite-based assessment of yield variation and its determinants in smallholder African systems. *Proc Natl Acad Sci* 114 (9): 2189-2194.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L.A., Valdés, J.B., Arteaga-Ramírez, R. y Vázquez-Peña, M.A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tec. y Ciencias del Agua, IMTA*, 8 (1): 35-52. ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019a). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019b). Estadísticas agrícolas de unidades de riego. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-unidades-de-riego>
- Chander, G., Markham, B.L. & Helder, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sens Environ* 113: 893-903.
- De Bernardis, C., Vicente G-Guijalba, F., Martínez-Marín, T. & López-Sánchez, J. (2016). Particle filter approach for real-time estimation of crop phenological states using time series of NDVI images. *Remote Sens* 8: 610.
- Espinosa, E.J.L., Palacios, V.E., Tijerina, Ch.L., Flores, M.H. y Quevedo, N.A. (2017). Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8 (1): 95-104.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Mejía-Sáenz, E. y Sifuentes-Ibarra, E. (2012). Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana* 30 (1): 59-67.
- Ghamghami, M., Nozar, G., Irannejad, P. & Ghorbani, K. (2019). Comparison of data mining and GDD-based models in discrimination of corn phenology. *Int J Plant Prod* 13 (1): 11-22.

- Heupel, K., Spengler, D. & Itzerott, S. (2018). A progressive crop-type classification using multitemporal remote sensing data and phenological information. *J Photogram Remote Sens Geoinform Sci* 86: 53-69.
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ* 83: 195-213.
- Hufkens, K., Melaas, E.K., Mann, M.L., Foster, T., Ceballos, F., Robles, M. & Kramer, B. (2019). Monitoring crop phenology using a smartphone based near-surface remote sensing approach. *Agr Forest Meteorol* 265: 327-337.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2017). Agenda Técnica Agrícola Sinaloa. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Ciudad de México, México. 209 pp. <https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/>
- Jensen, J.R. (2007). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective, 2nd ed Prentice Hall series in geographic information science, USA. ISBN 0-13-188950-8. 592 pp.
- Kamble, B., Kilic, A. & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sens* 5: 1588-1602.
- Kimball, B.A, White, J.W., Wall, G.W. & Ottman, M.J. (2012). Infrared-warmed and unwarmed wheat vegetation indices coalesce using canopy-temperature-based growing degree days. *Agron J* 104 (1): 114-118.
- Liao, C.H., Wang, J., Dong, T., Shang, J., Liu, J. & Song, Y. (2019). Using spatio-temporal fusion of Landsat-8 and MODIS data to derive phenology, biomass and yield estimates for corn and soybean. *Sci Total Environ* 650: 1707-1721.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y. & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors* 7: 2636-2651.
- Mavi, H.S. & Tupper, G.J. (2004). Chapter 3: Environmental temperature and crop production. In: *Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture* (pp. 43-70). The Haworth Press Inc., NY.
- NASA. (2019). Landsat image gallery. <https://landsat.visibleearth.nasa.gov/>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia (Mexico)* 40 (1): 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J.M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E. & Rendón-Pimentel, L. (2007). Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agr Water Manage* 89: 81-88.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Ontiveros, C.R.E., Iñiguez, C.M. y Rojano, A.A. (2014). Proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa. In: *Sinaloa y el cambio climático global; Flores-Campaña LM et al. (eds), pp: 115-131. Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación y Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, Mexico.*
- QGIS. 2019. User Guide. Release 3.4. QGIS Project. <https://www.qgis.org/en/docs>.

- Reed, B.C., Brown, J.F., Vanderzee, D.L., Thomas, R.M., James, W. & Ohlen, D.O. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *J Veg Sci* 5: 703-714.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J. & Benson, G.O. (1992). How a corn plant develops. Special report 48 (rev.). Iowa State University. Coop. Ext. Serv., Ames, IA, USA.
- Roth, G.W. & Yocum, J.O. (1997). Use of hybrid growing degree day ratings for corn in the northeastern USA. *J Prod Agr* 10: 283-288.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Proc Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symp. Greenbelt: NASA SP-351, 3010-3017.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Avance de siembras y cosechas. Gobierno de México. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/
- Sifuentes, I.E., Macías, C.J., Ruelas, J.R., Preciado, P., Ojeda, W., Inzunza, M.A, y Samaniego, J.A. (2015). Mejoramiento del grado de uso del nitrógeno en maíz, mediante técnicas parcelarias de riego por superficie. *Rev Mex Cienc Agr* 6 (8): 1903-1914.
- Teal, R.K., Tubana, B.S., Girma, K., Freeman, K.W., Arnall, D.B. & Walsh, O. (2006). In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agron J* 98: 1488-1494.
- Tsouros, D.C., Bibi, S. & Sarigiannidis, P.G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information* 10 (11): 349.
- Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). (2014). Sinaloa ante el cambio climático global; Flores Campiña LM et al., Ed. Universidad Autónoma de Sinaloa, México. ISBN: 978-607-737-051-2. 385 pp.
- USGS. (2018). USGS Global visualization viewer (Glovis). United States Geological Survey. <https://glovis.usgs.gov/>
- USGS. (2019). Landsat 8 (L8) data users handbook Version 4.0. United States Geological Survey, Sioux Falls, SD, USA.
- Viña, A., Gitelson, A.A., Rundquist, D.C., Keydan, G., Leavitt, B. & Schepers, J. (2004). Monitoring corn (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agron J* 96: 1139-1147.
- Whitcraft, A.K., Vermote, E.F., Becker, R.I. & Justice, C.O. (2015). Cloud cover throughout the agricultural growing season: impacts on passive optical earth observations. *Remote Sens Environ* 156: 438-447.
- Yanfei, W., Xinhua, T., Gang, Ch., Deqiang, L. & Zhenfeng, H. (2019). Remote detection of large-area crop types: The role of plant phenology and topography. *Agriculture* 9 (7): 150.
- Zhong, L., Gong, P. & Biging, G.S. (2014). Efficient corn and soybean mapping with temporal extendability: a multi-year experiment using Landsat imagery. *Remote Sens Environ* 140: 1-13.

7. DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN DEL SERVICIO DE RIEGO PARA GRANDES ZONAS AGRÍCOLAS.

7.1. Resumen

La alta competencia por el agua, las sequías recurrentes, la intensificación de la variabilidad climática y la ineficiencia de la gestión del servicio de riego, son problemas constantes que enfrentan cada año las grandes zonas de riego de México poniendo en riesgo su estabilidad económica y social, debido a que no se dispone de herramientas tecnológicas que permitan adaptar tecnologías tradicionales como la gestión del servicio de riego, a estos nuevos escenarios. El objetivo de la presente tesis doctoral fue generar un nuevo modelo de gestión del servicio de riego bajo escenarios de operación contrastantes para grandes zonas agrícolas, que utilice modelación del desarrollo de cultivos, planeación integral de riegos y seguimiento de planes integrales apoyado con imágenes de satélite. El trabajo se realizó en el DR075 ubicado en la región norte de Sinaloa, México mediante las siguientes acciones: 1) análisis del modelo tradicional de servicio de riego, 2) identificación de problemas del servicio de riego tradicional, 3) definición de componentes y conceptualización del nuevo modelo de gestión, 4) selección de herramientas tecnológicas, 5) estudio y evaluación de los componentes del nuevo modelo y 6) diseño del modelo. Se generaron procedimientos e información específicos para los componentes principales: *escenarios de operación, patrón de cultivos, períodos óptimos de siembra, plan integral de riegos y seguimiento del plan integral apoyado con imágenes de satélite*. Las tecnologías usadas fueron AquaCrop calibrado localmente, programación y seguimiento de riego basada en GDD a través de internet e imágenes de satélite LANDSAT. Se propusieron nueve escenarios de operación derivados de tres hídricos (bajo, medio y alta) y tres climáticos (frío, neutro y caliente), se definieron criterios para la selección del patrón de cultivos; se generaron las metodologías para la exploración de períodos óptimos de siembra con AquaCrop, así como para la elaboración y seguimiento de planes integrales dinámicos apoyado con sensores remotos. La evaluación de cada componente generó resultados significativos que contribuyen a la mejora del servicio de riego. El modelo representa una de las primeras propuestas que integra tecnologías de última generación vinculadas con la gestión del servicio de riego y está preparado para su implantación en las zonas de riego de México.

Palabras clave: variabilidad climática, escenarios de operación, AquaCrop, programación integral, adaptación, eficiencia y productividad.

7.2. Introducción

Las áreas destinadas a la agricultura de riego en México superan las seis millones de hectáreas y son operadas principalmente por distritos (DR) y módulos de riego (MR), los más extensos y productivos se encuentran en la región noroeste cuya economía depende de la agricultura, como el DR075 con casi 300000 ha cosechadas anualmente y el mayor productor de maíz con rendimiento medio de 12.5 t ha⁻¹ y una producción entre las cinco a siete millones de toneladas por año (SIAP, 2019; SIAP, 2018). Sin embargo, periodos frecuentes de sequías, intensificación de la variabilidad climática, presencia de eventos climáticos atípicos como heladas e inundaciones y bajas eficiencias en el manejo y servicio de riego, son problemas comunes de estas zonas que afectan su estabilidad debido a su limitada capacidad de resiliencia (Olmedo-Vázquez et al., 2017; Sifuentes-Ibarra et al., 2020).

Estudios recientes sobre cambio climático en el norte de Sinaloa reportan una tendencia del incremento de la temperatura de 1 a 2 °C con respecto al periodo base 1961-1990 y una reducción de la precipitación (Castillo-Castillo et al., 2017; Lobato-Sánchez y Altamirano-Del-Carmen, 2017) efecto que provocará el acortamiento de ciclos fenológicos de la mayoría de los cultivos, debido a una acumulación más rápida de los requerimientos de calor, con impactos negativos en la gestión y productividad de las zonas de riego (Ojeda-Bustamante et al., 2014). Ante estos escenarios se requiere de herramientas tecnológicas que ayuden a reducir sus posibles impactos ya que las acciones que se utilizan actualmente no cuentan con las bases científicas requeridas. En este sentido, los modelos de simulación de cultivos como AquaCrop, la programación y seguimiento del riego basados en GDD y el uso de imágenes de satélite para el monitoreo fenológico de cultivos, han demostrado su eficiencia en las zonas de riego, aunque solo se han aplicado en forma aislada. AquaCrop por ejemplo su mayor uso ha sido en estudios de riego deficitario y fechas de siembra (Heng et al.; Hamid et al., 2015); la programación del riego basada en GDD es parte de algunos sistemas como el propio AquaCrop, el sistema AZCHED en Arizona, USA y el programa IRRIMODEL© en algunos DR de Sinaloa, México (Ojeda-Bustamante et al., 2006; Sifuentes- Ibarra et al., 2015; Mendoza-Pérez et al., 2019).

La percepción remota se ha enfocado también en forma aislada al monitoreo de la fenología de cultivos (Reed et al., 1994; Yanfei et al., 2019), en la estimación de variables biofísicas como biomasa y rendimiento, estrés por sequía y cobertura de cultivos (Atzberger, 2012), o combinando modelos empíricos como Hargreaves, Thornthwaite y Blanney-Cruddle para estimar ETo a partir de Ta adquirida del satélite MODIS/Terra (Eiji et al., 2011). También se han generado modelos que combinan información de satélites con datos extraídos de otras fuentes, como el modelo de balance de energía SEBAL que estima la evaporación del cultivo en función de la temperatura superficial captada por sensores del satélite LANDSAT o MODIS en la región térmica del infrarrojo (Allen et al., 2011).

Las zonas de riego de México requieren de un nuevo modelo de gestión del servicio de riego que utilice en forma integral este tipo de herramientas para adaptarse a escenarios climáticos y operativos, es por ello que el objetivo de la presente trabajo de investigación fue generar un nuevo modelo para la gestión del servicio de riego bajo escenarios de operación contrastantes (climáticos, disponibilidad hídrica y manejo) en grandes zonas agrícolas, utilizando modelación de cultivos, planeación integral de riegos basado en GDD y seguimiento de planes integrales apoyado con imágenes de satélite en el DR075, el más extenso y productivo de México.

7.2.1. Modelos relacionados con la gestión del servicio de riego

En el Cuadro 7.1 se presenta la descripción de algunos de los modelos relacionados con el servicio de riego desarrollados y aplicados para las zonas de riego de México y otros países. Se puede observar que la mayoría de estos usan herramientas para la programación del riego a nivel de parcela y grandes zonas de riego.

Cuadro 7.1. Descripción de algunos modelos relacionados con la gestión del servicio de riego

Modelo	Descripción	Referencias
<i>Modelos con aplicación a nivel parcela</i>		
SIMIS-FAO	SIMIS fue desarrollado por la FAO para facilitar las actividades operativas en las redes de riego y mejorar la administración integral del agua. Es un programa desarrollado en dBASE IV. Su estructura principal muestra: Proyectos, Soporte de proyectos, Gestión de proyectos y Configuración. El módulo proyecto incluye: clima, cultivos, suelos, infraestructura física, tenencia de la tierra, maquinaria e implementos y personal. Las herramientas de gestión de los proyectos son: agrícolas, requerimiento de agua para cultivos,	Hatcho & Sagardoy (1996)

Modelo	Descripción	Referencias
	planeación estacional de riego, programación de riego, consumo de agua, contabilidad, actividades y costos de operación, mantenimiento y tarifas de agua.	
AquaCrop	AquaCrop modela los requerimientos hídricos de los cultivos y el rendimiento como una función de Tr. Integra en forma continua la relación suelo-cultivo-atmósfera considerando el suelo a través de su balance hídrico, la planta a través de los procesos de crecimiento, desarrollo y rendimiento, y la atmósfera con su régimen térmico, lluvia, demanda evaporativa y concentración de CO ₂ .	Steduto et al. (2012)
IRRIMODEL©	Modelo de programación integral y pronóstico del riego a través de Internet bajo el concepto GDD, considerando variables ambientales. Una de las principales ventajas es su simplicidad de adaptación al manejo agronómico de los cultivos a nivel parcelario lo cual garantizado su aplicación.	Sifuentes-Ibarra y Macías-Cervantes (2015)
<i>Modelos con aplicación en grandes zonas de riego</i>		
Spriter-GIS	Spriter-GIS se desarrolló originalmente para programación y pronóstico del riego a nivel parcela para los DR de México. El sistema emigró como una herramienta para la gestión de sistemas de riego a gran escala. Incluye los siguientes componentes: básico, contabilidad de agua de riego, programación de riego, programación de entrega de agua, informes estadísticos, proyección de agua y generador de mapas.	Ojeda-Bustamante et al. (2007)
HuraGIS	Sistema para evaluar el comportamiento del riego en asociaciones de usuarios (WUA) de Valencia, España, usando ortofotos e indicadores fisiológicos y de ingeniería para estimar indicadores de desempeño como SIPI (Seasonal Irrigation Performance Indicator) que representa la relación entre los requerimientos de riego y el volumen actual aplicado, para identificar parcelas con exceso y déficit de riego.	López-Pérez et al. (2012)
SWDIS	Sistema de distribución de agua inteligente para sistema de riego que utiliza un microcontrolador para controlar la distribución del agua según a los requerimientos de los cultivos. Los requerimientos de riego en tiempo real son medidos a través de sensores colocados en cada campo. Esta aplicación está basada en GUI que permite al usuario monitorear y controlar la distribución del agua por adelantado. El usuario también puede analizar fácilmente la historia de la distribución del agua en	Uddin-Khand & Raza-Barket (2015)

Modelo	Descripción	Referencias
	forma de gráficos y estimar el consumo de energía con respecto a los cultivos.	
DEMETER- project	Validación de procedimientos y metodologías usando sensores remotos para determinar la disponibilidad de agua en el suelo en cualquier momento y aplicar láminas de riego estrictamente necesarias para optimizar el desarrollo de cultivos usando imágenes de satélite LANDSAT-5. Trabajo desarrollado en el Distrito de Riego Divor, Évora, Portugal.	Toureiro et al. (2017)
e-SARAS & Pleiades	El Servicio de Asistencia en Riego Asistido por Satélite (e-SARAS), es un programa de la Universidad de Castilla-La Mancha, España de mucho éxito derivado del proyecto DEMETER (Demonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services). Otra extensión de este proyecto en México fue el programa Pleiades (Participatory Low-Cost Earth-Observation-Assisted Irrigation Advisory: An Element Of Sustainable Water Management), en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora durante el periodo 2006-2009, donde se desarrolló un sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de los cultivos por medio del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas) por parcela; permitiendo al productor comparar los rendimientos de ciclos pasados y tener una evaluación del desarrollo de sus cultivos.	Espinosa-Espinosa et al. (2017)

7.3. Materiales y métodos

El nuevo modelo de gestión de servicio de riego se conceptualizó y desarrolló en el DR075, con la colaboración de los módulos de riego Santa Rosa III-1, Batequis II-3 y Ruiz Cortines, así como en el Campo Experimental Valle del Fuerte del INIFAP donde se llevaron a cabo algunos trabajos experimentales. La ubicación geográfica y características agroclimáticas se presentaron en capítulos previos.

7.3.1. Descripción del modelo tradicional de servicio de riego

El servicio tradicional de riego de la zona de estudio inicia una vez que el plan de riegos (PR) es autorizado por el comité hidráulico el primer día del mes de octubre, el agua solicitada por los usuarios a través de los MR se conduce desde la fuente de abastecimiento hasta las unidades, módulos, zonas, secciones de riego y parcelas a través de un sistema de canales.

Los PR los elabora cada MR con el apoyo del Software Plan-DR de acuerdo a la normatividad de la CONAGUA; los anexos que integran el PR se presentan calendarizados en forma mensual y en algunos casos en forma decenal. Para poder recibir el servicio de riego, el productor debe pagar una cuota por permiso de siembra y otra por servicio de riego, así como mantener canales de riego, canales de drenaje y caminos de acceso a la parcela en buen estado (Figura 7.1.).

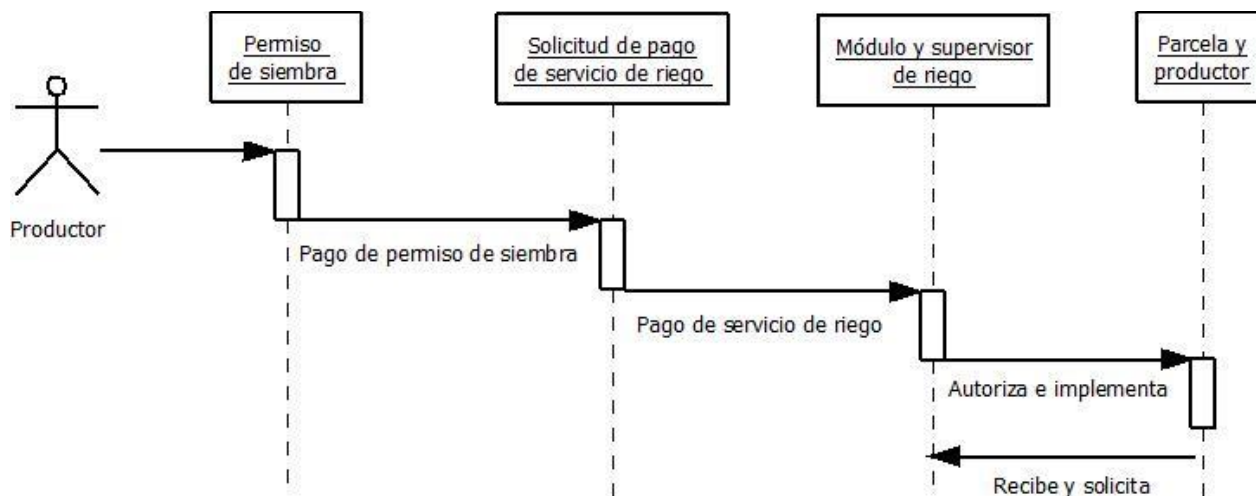


Figura 7.1. Proceso para recibir el servicio de riego en módulos de riego del Distrito de Riego (DR) 075

El seguimiento tradicional del plan de riegos se lleva a cabo en cuatro etapas: 1) elaboración del programa semanal de riegos, 2) entrega de volúmenes, 3) supervisión y evaluación del riego y 4) seguimiento productivo e hidrométrico. El programa semanal se elabora con las solicitudes de riego que hacen los productores al supervisor de riego en puntos de reunión establecidos.

7.3.2. Identificación de problemas del servicio de riego tradicional

La identificación de los principales problemas del servicio de riego se realizó mediante entrevistas personales con directivos y personal técnico de los tres MR, complementadas con recorridos de campo. Los problemas se identificaron y priorizaron para cada componente del modelo tradicional.

7.3.3. Definición de componentes y conceptualización del nuevo modelo de gestión

Los componentes del nuevo modelo de gestión se definieron a partir de los problemas identificados del modelo tradicional, para posteriormente conceptualizar el nuevo modelo.

7.3.4. Selección de herramientas tecnológicas y bases de datos

Una vez definidos los componentes y conceptualizado en nuevo modelo, se seleccionaron las herramientas tecnológicas y bases de datos a utilizar para el manejo y solución de problemas por componente; en los capítulos asociados a cada componente se describen las herramientas utilizadas.

7.3.5. Estudio y evaluación de los componentes del nuevo modelo

Cada componente del nuevo modelo de gestión se estudió y evaluó por separado para la generación de información y metodologías con respaldo científico requeridas por el modelo, los cuales se mostraron en los capítulos dos al siete. Entre los más importantes destacan el estudio del efecto de la variabilidad climática en los periodos de siembra tradicionales de los principales cultivos del DR075 usando AquaCrop, la generación de metodologías para la elaboración y seguimiento de planes integrales de riego (PIR) basadas en GDD y la metodología para el monitoreo fenológico de cultivos con imágenes de satélite en grandes zonas de riego.

7.3.6. Diseño e integración del nuevo modelo de gestión de servicio de riego

Una vez definidos los componentes del modelo, así como generados la información y procedimientos, se diseñó la arquitectura general del modelo. Posteriormente cada componente se enlazó con toda la información y procesos para su implementación.

7.3.7. Identificación de impactos potenciales

La identificación de los beneficios e impactos potenciales a corto plazo se realizó a partir de los resultados encontrados en los estudios y evaluaciones de cada componente y se ubicaron en los componentes del modelo tradicional.

7.4. Resultados y discusión

7.4.1. Problemas del servicio de riego tradicional identificados en la zona de estudio

Los problemas identificados en cada componente del servicio de riego tradicional en la zona de estudio se presentan en el Cuadro 7.2. Se observa que la deficiencia en el servicio inicia desde la elaboración de planes de riego al no considerar la diversidad de fechas de siembra y variabilidad climática.

Se observa también necesidad de acompañamiento técnico para el seguimiento y ajuste del plan de riegos con herramientas de fácil adopción. Existe una gran fuente de errores en las bases de datos y ausencia total de medición a nivel parcelario lo cual impide que se puedan realizar evaluaciones precisas del desempeño de estas zonas de riego.

Cuadro 7.2. Problemas del servicio de riego tradicional identificados en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa.

Componente	Problemas identificados	Clave
Estimación de cuota de riego	- No son congruentes con la calidad en el servicio de riego, principalmente a pequeños productores	ECR-1
Plan de riegos- nivel módulo	- Coeficientes unitarios no consideran requerimientos de riego y eficiencias de riego determinados localmente, no se considera el efecto de la fecha de siembra ni variabilidad climática	PRM-1
Plan de riegos- nivel sección	- No se elaboran planes de siembra y riegos a nivel de sección derivando en inconsistencias con el plan modular, problemas en la operación de canales y en la entrega inoportuna de agua con repercusiones negativas en el rendimiento	PRS-1
	- No se cuenta con recomendaciones o “recetas de riego” por zonas homogéneas, afectando la eficiencia global del módulo de riego y el rendimiento de cultivos	PRS-2
	- No se cuenta con herramientas que ayuden al ajuste de programas de riego cuando se presenten eventos climáticos atípicos que alteren las labores agrícolas y desfase de siembras, con repercusiones negativas en la operación de la sección y rendimientos	PRS-3
Distribución- entrega	- En lo general no se planea adecuadamente la distribución del agua en áreas compactas de acuerdo a fechas de siembra ordenadas aguas arriba-aguas abajo, lo cual provoca retrasos en la entrega por deficiente operación de canales.	DIS-1
	- No se elaboran mosaicos del estado de riegos (programados, en proceso y aplicados) para identificar con anticipación periodos de alta demanda	DIS-2
	- No se cuenta con un programa de mejoramiento del riego parcelario permanente que mantenga al productor receptivo para seguir recomendaciones y adoptar nuevas técnicas de mejora	DIS-3
	- No se cuenta con programas de actualización parcelaria de diseño y construcción de canales y tomas granja	DIS-4

Modelo de gestión del servicio de riego para grandes zonas agrícolas, apoyado con percepción remota e información climática

Componente	Problemas identificados	Clave
Acompañamiento técnico	- Se acostumbra el intercambio de volúmenes de agua entre secciones lo cual genera descontrol en la operación.	DIS-5
	- No se aprovecha la humedad residual generada por escurrimientos superficiales y precipitación efectiva, como una acción de ahorro de volúmenes de agua.	ACT-1
	- No se utilizan herramientas para programación del riego de corto plazo considerando GDD y variables climáticas	ACT-2
	- La deficiente planeación modular y de sección, aunado al criterio tradicional del productor para solicitar riegos, afectan la operación adecuada de canales agudizándose en períodos de alta demanda.	ACT-3
	- No se cuentan con herramientas para el monitoreo de etapas fenológicas y estrés hídrico de cultivos a gran escala para la asignación de riegos de auxilio	ACT-4
	- Deficiente capacidad técnica del personal	ACT-5
	- No se identifican a tiempo riegos abandonados y escurrimientos fuera de la parcela (desagües)	ACT-6
Seguimiento productivo e hidrométrico	- En canales no se detectan a tiempo fugas de agua y sobrecargas provocando desperdicios de agua.	ACT-7
	- Alto porcentaje de parcelas con discrepancia entre superficies reales y registradas	SPH-1
	- Alto porcentaje de cultivos con alta discrepancia entre superficies y fechas de siembra reales y reportadas	SPH-2
Evaluación	- Planos vectoriales (Shape.files) incompletos con datos parcelarios incorrectos	SPH-3
	- No existe un programa de medición y evaluación del riego parcelario.	EVA-1
	- Se carece de programas de evaluación del desempeño del servicio de riego basado en indicadores	EVA-2
	- No se realizan encuestas de opinión y sugerencias con los usuarios del servicio de riego que ayuden a orientar mejor los servicios de módulos de riego	EVA-3

La diversidad de problemas en la gestión del servicio de riego tradicional descritos en el cuadro anterior justifica la necesidad de integrar herramientas tecnológicas que se han venido usando en forma aislada, en un nuevo modelo de gestión, como se ha reportado en algunas investigaciones (Hatcho & Sagardoy, 1996).

Otros ejemplos son el modelo desarrollado por Brithell & Brasington (2009) para la gestión de recursos naturales acoplando modelos de agricultura de subsistencia con modelos forestales y modelos dinámicos de distribución de agua. Este sistema de modelos ayudó a evaluar los impactos demográficos en la deforestación, corrientes hidrológicas y disponibilidad de agua. Winz et al. (2009) simularon el manejo de recursos hídricos y la solución de problemas de planificación regional, gestión de cuencas hidrográficas y gestión de aguas urbanas, utilizando la dinámica de sistemas combinada con la participación de los usuarios; concluyeron que esta herramienta contribuye a mejorar la resiliencia de los sistemas en su conjunto.

El modelo generado en el presente trabajo de tesis es uno de los primeros en México bajo este enfoque integrado lo cual representa un reto para su implantación en las grandes zonas agrícolas.

7.4.2. Diseño y arquitectura del nuevo modelo de gestión de servicio de riego

El nuevo modelo de gestión de servicio de riego quedó integrado por cinco componentes principales: 1) escenarios de operación, 2) patrón de cultivos, 3) períodos óptimos de siembra, 4) plan integral de riegos y 5) seguimiento del plan integral apoyado con imágenes de satélite. La Figura 7.2 muestra el esquema general del modelo de gestión que integra los componentes anteriores.

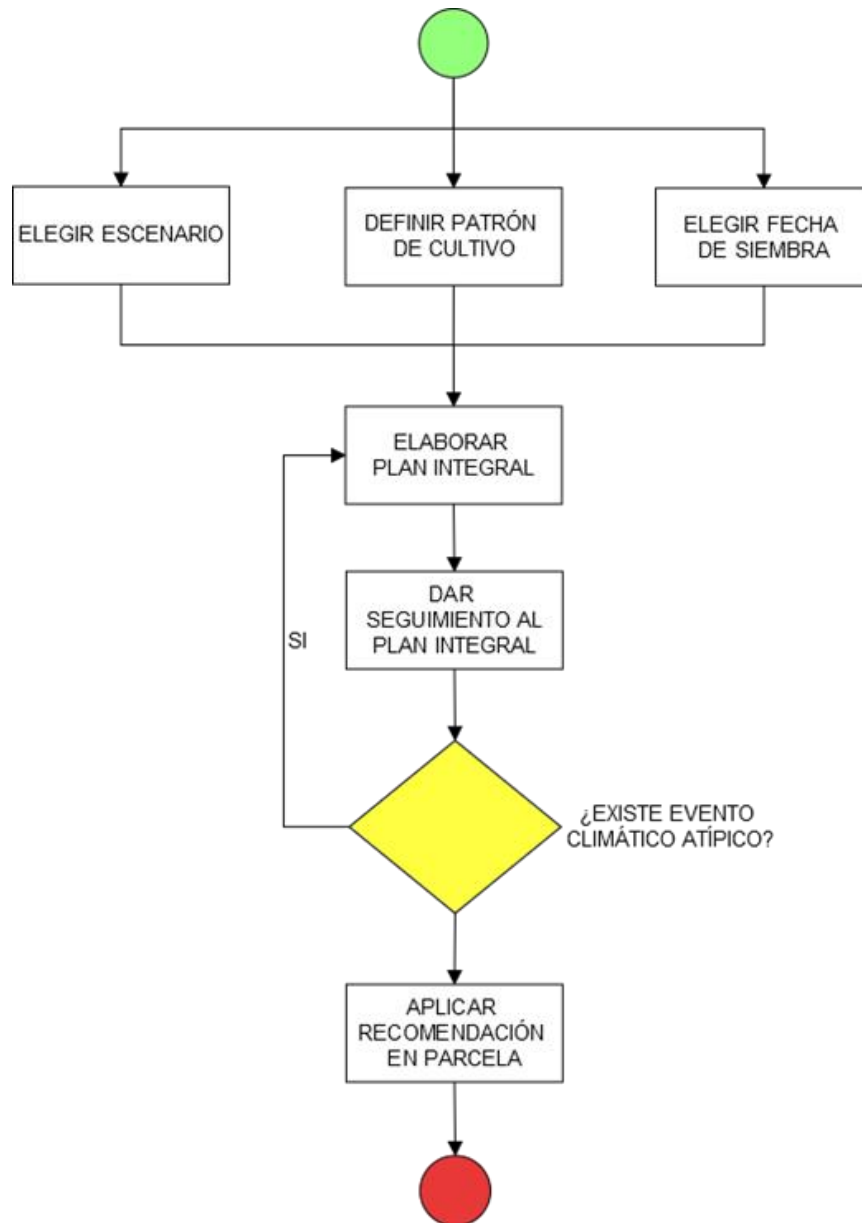


Figura 7.2. Esquema general del modelo de gestión del servicio de riego

7.4.2.1. Escenarios de operación

Los escenarios de operación se consideran de dos tipos: 1) disponibilidad hídrica y 2) escenarios térmicos. El conocimiento de la disponibilidad hídrica previo al inicio de un año agrícola es fundamental para la elaboración y ajuste de los planes de riego, así como para el diseño e implementación de acciones bajo escenarios de baja disponibilidad como riego deficitario (Capítulo 2). Este escenario considera a su vez tres sub-tipos derivados del almacenamiento histórico del sistema de presas los cuales para el DR075 fueron: i) bajo (B) con del 25 al 50% de

almacenamiento (1685 a 3370 hm³), ii) medio (M) con 51 al 75% de almacenamiento (3437 a 5055 hm³) y iii) alto (A) con 76 al 100% de almacenamiento (5122 a 6740 hm³). El escenario térmico esperado es importante para la selección de períodos óptimos de siembra, elaboración del PIR, estimación de volúmenes demandados y visualizar posibles efectos en productividad de los cultivos, estos escenarios se agruparon en fríos (F), neutros (N) y calientes (C), como se describió en los Capítulos 4 y 6. La Figura 7.3 muestra la organización de los dos escenarios de operación dentro del modelo.

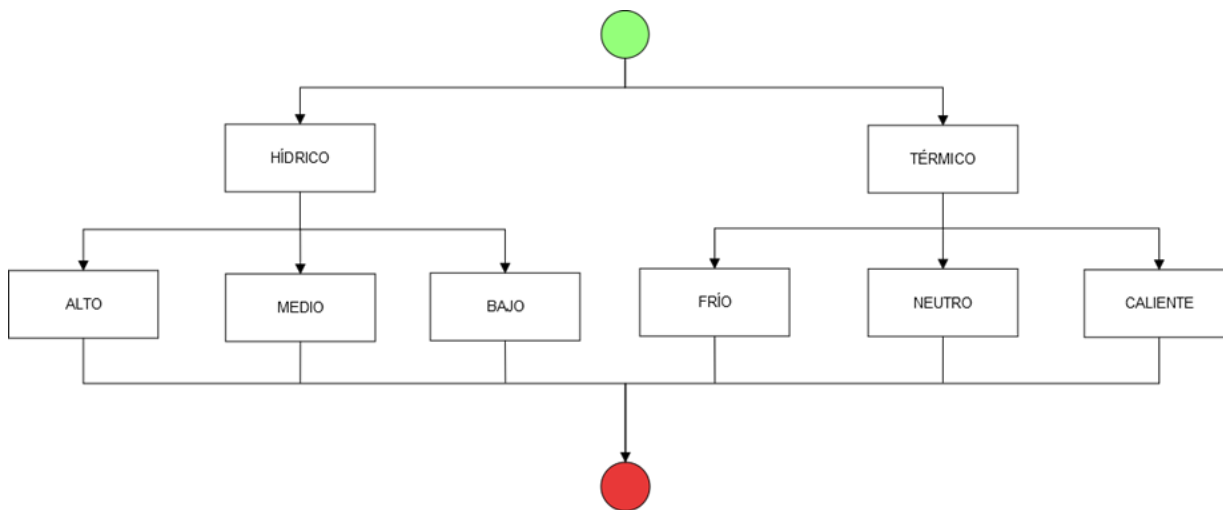


Figura 7.3. Escenarios de operación considerados en el modelo de gestión

La combinación de los tres subtipos de cada escenario, genera los nueve escenarios de operación que se muestran en el Cuadro 7.3.

Cuadro 7.3. Escenarios de operación del modelo de gestión del servicio de riego.

Climático	Disponibilidad hídrica	Escenario
F	A	FA
	M	FM
	B	FB
N	A	NA
	M	NM
	B	NB
C	A	CA
	M	CM
	B	CB

F: frío, N: neutro, C: caliente, A: alta, M: media, B: baja

7.4.2.2. Patrón de cultivos

Para la selección del patrón de cultivos se proponen cuatro criterios: 1) utilizar el patrón de cultivos de un ciclo con condiciones de disponibilidad hídrica similar al programado, 2) usar el promedio de los últimos 5 a 10 años, 3) considerar la intención de siembras de los usuarios y 4) combinación del primero con el tercero y del segundo con el tercero, como se muestra en la Figura 7.4. Los resultados reportados en el Capítulo 5 sugieren usar el criterio dos como mejor opción complementado con el tres al encontrar una diferencia relativa con respecto a lo realizado de solo -1.2% en maíz, de +3.3% en garbanzo y de -17.9% en frijol.

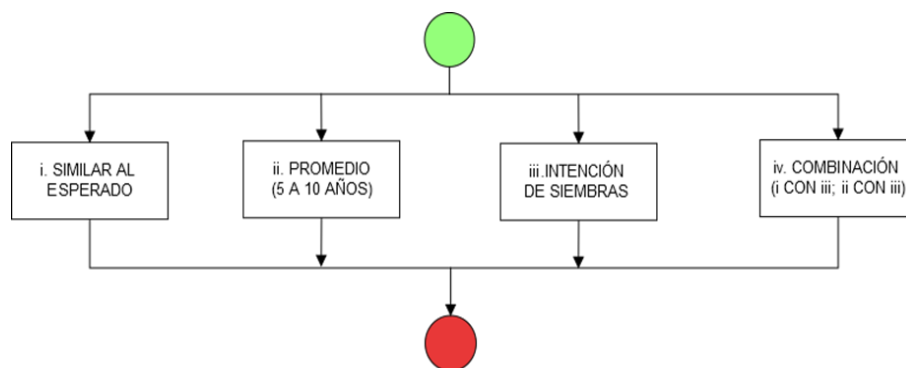


Figura 7.4. Criterios para la definición del patrón de cultivos

7.4.2.3. Periodos óptimos de siembra

Los periodos óptimos de siembra para los escenarios F, N y C, se incorporaron al modelo de gestión para que el productor evite establecer sus cultivos en períodos donde las condiciones climáticas esperadas puedan afectar su desarrollo (Figura 7.5); el MR por su parte, puede ajustar la distribución de la superficie de siembra tanto en la elaboración como en el seguimiento del PIR, iniciando desde aguas arriba hacia aguas abajo en las secciones de riego, principalmente en áreas con características de suelo poco heterogéneas, lo cual coadyuva a la mejora del rendimiento de cultivos y distribución del agua de riego. En la calibración del modelo AquaCrop con los cultivos de maíz, frijol y papa para la evaluación de periodos de siembra (Capítulos 3 y 4), se encontraron diferencias relativas (Δx) bajas entre los valores medidos y simulados de las variables biomasa (B), rendimiento (Y), índice de cosecha (HI) y evapotranspiración (ETc) en los tres cultivos, fluctuando entre cero y 11.6%. En maíz adicionalmente se encontró en la variable rendimiento un coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2_{NS}) de 0.953 y un coeficiente de masa residual (CRM) de -0.06,

lo cual indica una ligera subestimación de AquaCrop en esta variable; en la variable cobertura de dosel (CCi) el valor de R^2_{NS} fue de 0.87 y de CRM de -0.082.

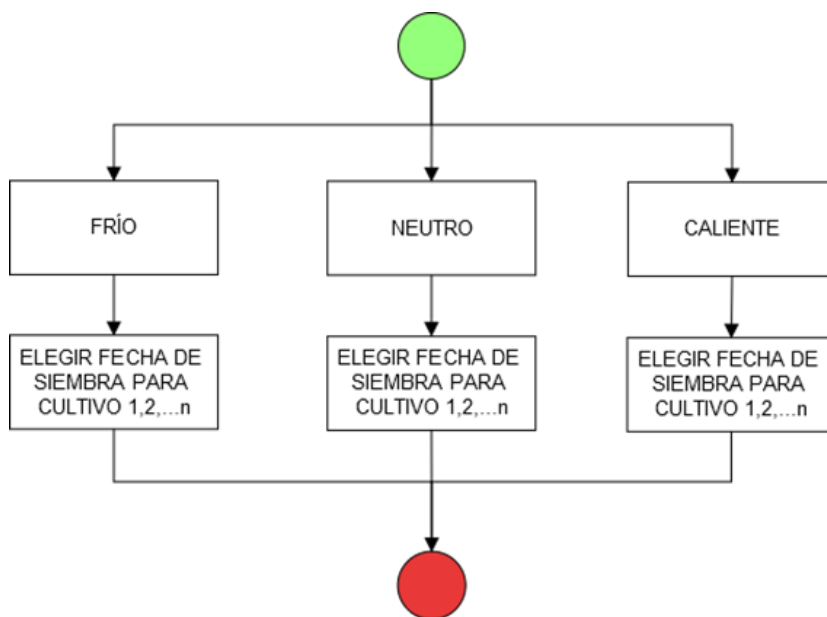


Figura 7.5. Selección de períodos óptimos de siembra de acuerdo al escenario térmico

El Cuadro 7.4 muestra los períodos óptimos de siembra y rendimiento máximo en el período (Y_x), en tres escenarios térmicos para los tres cultivos más importantes ciclo OI del DR075, generados mediante modelación biológica con AquaCrop (Capítulo 3). Para otras regiones agrícolas, se debe realizar una nueva calibración del modelo.

Cuadro 7 4. Periodos óptimos de siembra y rendimiento máximo en el período (Y_x), en tres escenarios térmicos para los cultivos más importantes ciclo OI del DR075 “Valle del Fuerte”, Sinaloa.

Escenario térmico	Cultivo	Inicio	Fin	Y_x (t ha ⁻¹)
F	Maíz	15/10	15/11	18.7
	Frijol	15/10	5/11	3.7
	Papa	15/10	15/11	44.4
N	Maíz	5/10	15/11	18.5
	Frijol	5/10	15/11	3.6
	Papa	15/10	25/11	43.2
C	Maíz	5/10	5/11	18.4
	Frijol	25/10	15/11	3.6
	Papa	25/10	25/11	41.2

F: frío, N: neutro, C: caliente

7.4.2.4. Plan integral de riegos (PIR)

Los PIR mostraron ser precisos, dinámicos y adaptables a escenarios de operación esperados e imprevistos, ya que son el resultado de coeficientes unitarios de riego calculados mediante programación integral basada en GDD validada para la zona de estudio. Para la elaboración del PIR se debe seleccionar el escenario de operación esperado y utilizar la metodología generada, descrita en el Capítulo 5. Es recomendable que además de realizar el PIR a nivel de MR se realice también para cada sección de riego del módulo, los pasos para elaborar el PIR se muestran en la Figura 7.6.

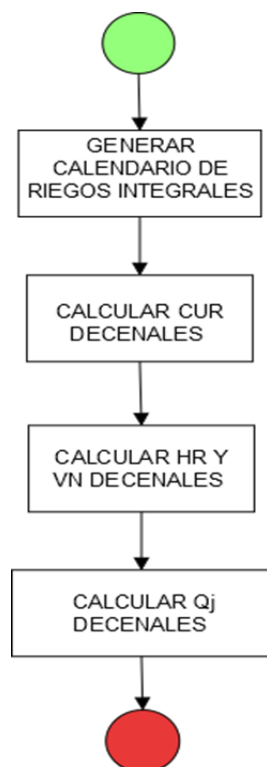


Figura 7.6. Elaboración del plan integral de riegos

7.4.2.5. Seguimiento del plan integral de riegos

En el nuevo modelo de gestión, el seguimiento del PIR se sugiere realizarlo en cada sección del MR con la plataforma GDD-IRRIMODEL© utilizada para su elaboración y con mapas de fenología derivados de imágenes de satélite LANDSAT (Figura 7.7), como verificador a gran escala de las recomendaciones generadas con la plataforma y como identificador espacial de zonas de estrés, como se describió en el Capítulo 6.

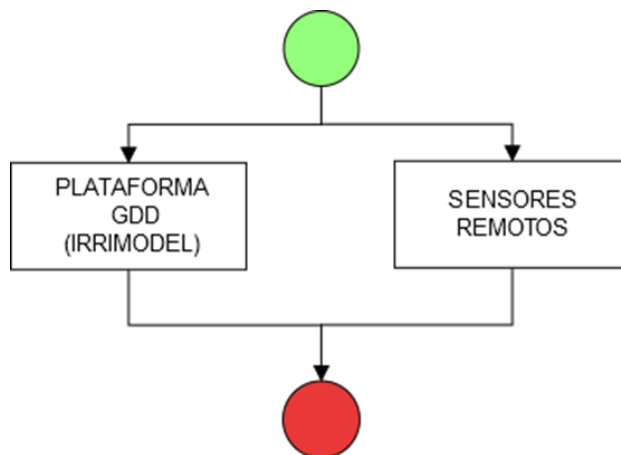


Figura 7.7. Seguimiento del plan integral de riegos

Plataforma GDD

Para el seguimiento del plan integral de riegos utilizando la plataforma GDD se realiza lo siguiente:

- 1) ingresar datos de parcelas y siembras, 2) importar valores diarios históricos de T_{med} y ET_o para un periodo de al menos 20 años clasificados como F, N y C, 3) definir escenario de operación esperado, alineado al del PIR, 4) agregar riegos iniciales y actualizar fechas de siembras realizadas, 5) actualizar clima (T_{med} , ET_o y P) para el ciclo activo, 6) generar plan de riegos semanal y 7) seguimiento del plan semanal. El procedimiento anterior se muestra esquematizado en la Figura 7.8.

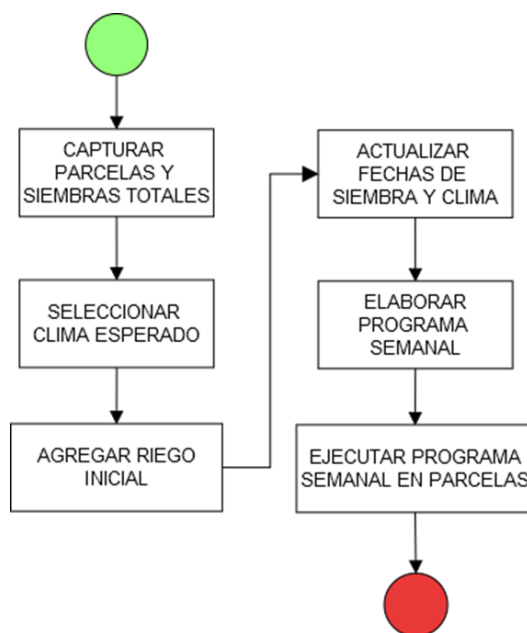


Figura 7.8. Seguimiento del plan integral con plataforma GDD

Una vez que todas las parcelas fueron establecidas, se pueden realizar proyecciones de hectáreas riego, volúmenes y gastos demandados para el resto del ciclo agrícola a través de un usuario adicional en la plataforma GDD, lo cual ayuda a cumplir con el PIR original y a la mejora de la operación de canales. Cuando se presenten eventos climáticos extremos y atípicos que alteran los programas de siembras iniciales, es recomendable consultar el posible impacto en rendimiento con las nuevas posibles fechas de siembra, usando AquaCrop para la toma de decisiones.

Sensores remotos

Los sensores remotos son un apoyo para el seguimiento del plan integral mediante el monitoreo temporal y espacial de etapas fenológicas asociadas al riego. La metodología desarrollada (Capítulo 6) indicó que al inicio del ciclo del cultivo, la precisión para monitorear las fases fenológicas fue mayor del 92% con los dos VIs y disminuyó a 86.6% en al final del ciclo, debido a la presencia de parcelas cosechadas con suelo desnudo o en senescencia; la Figura 7.9 muestra la secuencia de pasos para este proceso.



Figura 7.9. Seguimiento del plan integral de riegos apoyado con percepción remota

7.4.2.6. Aplicación de recomendaciones

Una parte fundamental para incrementar la productividad de cultivos y la eficiencia del servicio de riego, es la aplicación adecuada de las recomendaciones generadas tanto por la plataforma GDD y los sensores remotos. La secuencia de pasos para este proceso es la siguiente: 1) elaborar plan de distribución semanal de agua, 2) entrega en parcela, 3) supervisión del riego en parcela y 4) actualizar siembras y riegos en plataforma GDD. Lo anterior se esquematiza en la Figura 7.10.



Figura 7.10. Aplicación de recomendaciones en parcela

7.4.3. *Contribución del modelo a la mejora del servicio de riego tradicional*

Las contribuciones a la solución de problemas del servicio de riego tradicional en el corto plazo, mediante la aplicación por componente o integral del modelo de gestión del servicio de riego generado se presentan en el Cuadro 7.5, donde se aprecia que la mejora en el servicio de riego tradicional inicia desde la elaboración del PIR que represente la diversidad de fechas de siembra bajo escenarios de operación esperados (climáticos y disponibilidad hídrica).

Se sugiere que los PIR se elaboren también a nivel de sección de riego para coadyuvar al cumplimiento del PIR modular. Se observa varias necesidades de mejora en del componente “acompañamiento técnico”, pero a la vez viabilidad de solución de los cinco problemas indicados mediante el modelo de gestión, al igual que en el resto de los problemas enumerados.

Cuadro 7.5. Contribución estimada del nuevo modelo de gestión de servicio de riego, a la solución de problemas del servicio de riego tradicional en el DR075, Río Fuerte, Sinaloa.

Componente	Contribución a la solución de problemas	Clave
Plan de riegos-nivel módulo	- Metodología para la elaboración de PIR con CU derivados de requerimientos y eficiencias de riego locales, considerando fechas de siembra, variabilidad climática y disponibilidad hídrica.	PRM-1
	- Metodología para elaborar planes de riego y siembra a nivel de sección para coadyuvar en el cumplimiento de PIR modular, mejorando la operación de canales y entrega del agua de riego	PRS-1
Plan de riegos-nivel sección	- Recetas de riego por zonas homogéneas como guías iniciales para productores y técnicos.	PRS-2
	- Metodología para el ajuste del seguimiento del PIR en escenarios imprevistos que alteren las labores agrícolas y fechas de siembra programadas	PRS-3
Distribución-entrega	- Metodología para la planeación de la distribución del agua en áreas homogéneas y compactas desde arriba-aguas hasta aguas-abajo, de acuerdo a fechas de siembra,	DIS-1
	- Programa de transferencia de tecnologías de riego diseñado a las necesidades locales	DIS-3
Acompañamiento técnico	- Aprovechamiento de la humedad del suelo aportada por escurrimientos (aguas broncas) y lluvias	ACT-1
	- Aplicación de la plataforma GDD para programación del riego de corto plazo considerando variables climáticas	ACT-2
Acompañamiento técnico	- Programación de corto plazo coordinada con el productor para mejorar la operación de canales	ACT-3
	- Monitoreo de etapas fenológicas de los cultivos a gran escala mediante percepción remota y GIS, como apoyo al seguimiento de PIR que garantice el apoyo técnico inmediato a la mayoría de los productores.	ACT-4

Componente	Contribución a la solución de problemas	Clave
	- Reducción de riegos abandonados y escurrimientos (desagües) como consecuencia del acompañamiento técnico que requiere el modelo de gestión	ACT-6
Seguimiento productivo e hidrométrico	- Superficies parcelarias, superficies sembradas, fechas de siembra, y bases de datos de planos vectoriales corregidos, como requisito para el monitoreo de cultivos mediante percepción remota.	SPH-1 SPH-2 SPH-3
Evaluación	- Programa de medición y evaluación del riego parcelario como requisito para la implantación del modelo de gestión.	EVA-1
	- Información agrícola e hidrométrica de calidad para la evaluación del desempeño del servicio de riego basado en indicadores	EVA-2

7.5. Conclusiones

El análisis del modelo tradicional de servicio de riego y la identificación de su problemática, permitió diseñar el nuevo modelo de gestión basado en cinco componentes principales: 1) escenarios de operación, 2) patrón de cultivos, 3) períodos óptimos de siembra, 4) plan integral de riegos y 5) seguimiento del plan integral apoyado con imágenes de satélite. La evaluación de cada componente permitió obtener niveles de precisión adecuados, identificar áreas de mejora y contar con el conocimiento y procedimientos requeridos por el nuevo modelo de gestión, Se demostraron las capacidades de cada componente para la mejora de la gestión del servicio de riego y la productividad de cultivos. Para la aplicación del nuevo modelo bajo el enfoque integral propuesto representa un nuevo reto para las zonas de riego de México, para lo cual se requiere la automatización de procesos y contar con la participación de dependencias gubernamentales, módulos de riego, asociaciones de productores, empresas agrícolas y otros organismos.

7.6. Referencias

- Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J.M.H., Bastiaanssen, W. & Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrol. Process.* 25, 4011–4027 (2011), DOI: 10.1002/hyp.8408
- Atzberger, C. (2012). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing* 5(2) 949-981, <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Bithell, M. & Brasington, J. (2009). Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution. *Environmental*

- Modelling & Software* 24 (2009) 173–190, Doi:10.1016/j.envsoft.2008.06.016.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L.A., Valdés, J.B., Arteaga-Ramírez, R. & Vázquez-Peña, M.A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tec. y Ciencias del Agua, IMTA*, 8 (1): 35-52. ISSN 0187-8336. Jiutepec, Morelos, México.
- Eiji, M.E., Wibwrg, D.A., Pelikka, P.K.E. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *In: Applied Geography* 31 (2011) 251-258
- Espinosa-Espinosa, J.L., Palacios-Velez, E., Tijerina-Chávez, L., Flores-Magdaleno, H. & Quevedo-Nolasco, A. (2017). Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038. *Tecnología y ciencias del agua, vol.8(1)*, 95-104. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-07>
- Hatcho, N. & Sagardoy, J.A. (1996). Application of an Irrigation Scheduling Module of Scheme Irrigation Management Information System(SIMIS) in Mendoza, Argentina. *In: Rural and Environmental Engineering* 31 (8): 63-76.
- Hamid. A.S., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.A. & Reza, A.S. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. # Springer Science+Business Media Dordrecht 2015. DOI 10.1007/s11269-015-0973-3. Shiraz, Iran
- Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Lobato-Sánchez, R., & y Altamirano-Del-Carmen, M.A. (2017). Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 101–116. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-07>
- López-Pérez, E., Jiménez-Bello, M.A., Manzano, J., Palau, V., Royuela, A. & Intrigliolo, D.S. (2012). Irrigation performance in a water use association in Valencia, Spain. Engineering and physiological indicators. https://www.researchgate.net/profile/Alvaro_Royuela/publication
- Mendoza-Pérez, C., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Quevedo-Nolasco, A., Flores-Magdaleno, H., Ramírez-Ayala, C., & y Ascencio-Hernández, R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante atmómetro con fines de calendarización de riego. *Idesia (Arica)*, 37(4), 65–72. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019000400065>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., y Unland-Weiss, H. (2006). Programación intergral del riego en Maíz en el Norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13–25.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J.M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E. & Rendón-Pimentel, L. (2007). Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agr Water Manage* 89: 81-88.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Ontiveros-Capurata, R.E., Iñiguez-Covarrubias, M. y Rojano-Aguilar, A. (2014). Proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa. Sinaloa ante el cambio climático global, 107–122.
- Olmedo-Vázquez, V.M., Minjares-Lugo, J.L., Camacho-Poyato, E., Hernández-Hernández, M.L.

- y Rodríguez-Díaz, J.A. (2017). Uso del análisis envolvente de datos (DEA) para evaluar la eficiencia de riego en los módulos del distrito de riego no. 041, río yaqui (sonora, México). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(2), 127–148.
- Reed, B.C., Brown, J.F., Vanderzee, D.L., Thomas, R.M., James, W. & Ohlen, D.O. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 5: 703-714, @ IAVS; Opulus Press Uppsala. Printed in Sweden
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Panorama Agroalimentario 2019. Primera edición, 2019 © Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. 218pp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Sifuentes, I.E. y Macías, C.J. (2015). “IRRIMODEL” Programación integral y gestión del riego a través de internet, manual del usuario, versión 2.0. INIFAP-CIRNO-CEVAF. Publicación especial No. 14, noviembre de 2015, ISBN 978-607-425-911-7. Juan José Ríos, Sinaloa, México. 36 p.
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R.E. & Sánchez-Cohen, I. (2020). Improving the monitoring of corn phenology in large agricultural areas using remote sensing data series. *Spanish Journal of Agric. Research (SJAR)*, <https://doi.org/10.5424/sjar/2020183-16269>.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>
- Toureiro, C., Serralheiro, R., Shahidian, S. & Sousa, A. (2017). Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agricultural Water Management* 184 (2017) 211–220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>
- Uddin-Khand, Q. & Ali Raza-Barket, A. (2015). Smart Water Distribution for Irrigation System (SWDIS). *Int. Journal of Innovative Tech. and Exploring Engineering (IJITEE)*, 5(4): 1-7. ISSN: 2278-3075.
- Winz, I., Brierley, G. & Trowsdale, S. (2009). The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management. *Water Resour Manage.* (2009) 23:1301–1323. DOI 10.1007/s11269-008-9328-7.
- Yanfei, W., Xinhua, T., Gang, Ch., Deqiang, L. & Zhenfeng, H. (2019). Remote Detection of Large-Area Crop Types: The Role of Plant Phenology and Topography. *Agriculture* 2019, 9, 150. doi:10.3390/agriculture9070150.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Generales

Conclusiones: el modelo de gestión del servicio de riego propuesto, quedó conceptualmente preparado para contribuir a la solución de los principales problemas relacionados con la gestión del servicio de riego que actualmente enfrentan productores, empresas agrícolas, organismos agrícolas, módulos y distritos de riego de México, agudizados por la intensificación de la variabilidad climática. El nuevo modelo de gestión es uno de los primeros que integra diferentes herramientas tecnológicas en México como modelación de cultivos, programación integral del riego, percepción remota y plataformas computacionales, demostrando capacidades para adaptarse a escenarios climáticos, de disponibilidad hídrica y de manejo del riego a través de cada uno de sus componentes, con beneficios operativos y productivos.

Recomendaciones: se recomienda que el nuevo modelo de gestión además de aplicarse en grandes zonas, se utilice en pequeñas áreas de riego, como secciones de módulos de riego y empresas agrícolas. Se recomienda también su implantación gradual en las zonas de riego al ser una tecnología de bajo costo para la solución de la problemática actual, enfocada a mejorar la eficiencia en el uso del agua y la productividad de cultivos. La aplicación del nuevo modelo bajo el enfoque integral propuesto, representa un nuevo reto para las zonas de riego de México, para lo cual se requiere la automatización de procesos y contar con la participación de dependencias gubernamentales, módulos de riego, asociaciones de productores, empresas agrícolas y otros organismos.

8.2. Específicas por componente

Transversal (Capítulo 2): Déficit hídrico en maíz considerando fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua

Conclusiones: este componente se consideró transversal al aportar información a todos los componentes del modelo de gestión generado. Es de gran utilidad en escenarios de baja disponibilidad hídrica. La distribución de riegos con EA igual o mayor a 64% bajo estos escenarios, mejora el rendimiento y la productividad del agua.

Recomendaciones: En condiciones normales de disponibilidad hídrica, evitar la aplicación del quinto riego de auxilio en suelos predominantes del DR075. Bajo condiciones restringidas de disponibilidad hídrica, aplicar tres riegos de auxilios (V9, R1 y R3) con EA mayores a 60%.

Aprovechar la humedad residual del suelo al momento de la siembra y evitar terminar el ciclo del cultivo con alto contenido de humedad en suelo.

Escenarios de operación

Conclusiones: los nueve escenarios de operación propuestos formados por condiciones térmicas y de disponibilidad hídrica, permiten diseñar estrategias de gestión del servicio de riego previo al inicio del ciclo agrícola.

Recomendaciones: se recomienda conocer al inicio de año agrícola, el escenario de disponibilidad hídrica de las fuentes de abastecimiento (baja, media o alta) propuesta en el Capítulo 5. Para definir el escenario térmico de operación, se recomienda considerar de inicio clima neutro (N) y realizar comparaciones de temperaturas diarias presentadas en el ciclo actual con las presentadas en ciclos previos para posible cambio de escenario. Se requiere contar con herramientas de pronóstico climático estacional para mayor precisión en la definición de escenarios térmicos.

Patrón de cultivos

Conclusiones: el criterio para la selección de patrones de cultivos utilizando el patrón del ciclo anterior resultó impreciso.

Recomendaciones: es recomendable utilizar el criterio del promedio de 5 a 10 años combinado con la intención de siembras del productor para la definición de patrones de cultivos.

Fechas-siembra

Conclusiones: el análisis climático demostró que existe anomalía positiva de temperatura media con repercusiones en la intensificación de la variabilidad climática y desarrollo de los cultivos. La calibración experimental del modelo AquaCrop en los cultivos de maíz, frijol y papa tuvo alta nivel de precisión, permitiendo identificar periodos óptimos de siembra en tres escenarios térmicos.

Recomendaciones: considerar los periodos de siembra identificados, para la elaboración y seguimiento de planes integrales de riego. Se recomienda consultar AquaCrop para la planeación de siembras en escenarios que alteren los programas de siembra óptimos.

Planes integrales- seguimiento GDD

Conclusiones: la alta variación en el número, intervalos y láminas de riego generó discrepancias de CUHR y CUVN calculados con los métodos tradicional e integral, con sobre-estimación de volúmenes totales demandados con el PRT.

La plataforma GDD demostró capacidad para ajustar en forma automática el seguimiento del PR ante un escenario de desfase de fechas de siembra. Se demostró que esta herramienta coadyuva a la mejora del rendimiento y eficiencia de aplicación en zonas de riego. En cultivos como papa además del rendimiento, mejora la calidad de tubérculos al tener mayor control del manejo del déficit hídrico relacionado con tubérculos deformes, enfermos y rezagas.

Recomendaciones: se requiere automatizar la elaboración de PIR con la plataforma GDD y vincularla con la metodología tradicional. Se recomienda aplicar esta herramienta no solo para la elaboración y seguimiento de PIR, sino para mejorar la cantidad y calidad de cosechas evitando condiciones de exceso de humedad en suelos pesados y clima frío, y considerando la sensibilidad hídrica de cultivos.

Monitoreo fenológico con imágenes de satélite

Conclusiones: la variación en el manejo del cultivo y suelos afectó la precisión de los modelos espectrales para el monitoreo de la fenología de maíz derivados de imágenes LANDSAT. La metodología generada mostró mayor precisión en la detección de etapas tempranas que en tardías y quedó preparada para su aplicación con GIS en grandes zonas de riego.

Recomendaciones: se recomienda evaluar otros índices de vegetación (VIs) para el monitoreo fenológico complementados con VIs para detección de estrés hídrico. Utilizar áreas homogéneas en fechas de siembra y suelos predominantes de la zona de trabajo para mejorar la precisión de VIs. Incluir parcelas sin cultivo, con maleza y cosechados en los modelos espectrales. Se recomienda realizar una etapa de validación de la metodología enfocada al apoyo del seguimiento de planes integrales de riego.

APÉNDICE A

SÍMBOLOS PRINCIPALES Y ACRÓNIMOS UTILIZADOS

Apéndice A.1. Símbolos principales y acrónimos utilizados

Símbolo / acrónimo	Significado y unidades
A	Área (m ²)
ACU	Asociaciones Civiles de Usuarios
ALEXI	Atmosphere Land Exchange Inverse
ALP	Altura de planta (m)
AP	Agricultura de precisión
APAR	Radiación absorbida fotosintéticamente activa
AUPA	Asociación (es) de Usuarios Productores Agrícolas
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
B	Biomasa (t ha ⁻¹)
C	Caliente
CC	Capacidad de campo (%; cm ⁻³ cm ⁻³)
CCi	Cobertura actual del dosel del cultivo (%)
CCx	Cobertura máxima del dosel del cultivo (%)
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CU	Coefficiente unitario
CUHR	Coefficiente unitario de hectáreas riego
CURN	Coefficiente unitario de requerimiento de riego neto
CUSF	Coefficiente unitario de superficie física
CUVN	Coefficiente unitario de volumen neto
DDS	Días después de siembra
DR	Distrito (s) de Riego
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
E	Evaporación (mm; mm d ⁻¹)
EA	Eficiencia de aplicación (%)
EC	Eficiencia de conducción (%)
EMA	Estación meteorológica automatizada
erfc	Función complementaria del error
Es	Escurrimiento superficial (L s ⁻¹)
ET	Evapotranspiración (mm; mm d ⁻¹)
ET _a	Evapotranspiración actual (mm; mm d ⁻¹)
ET _c	Evapotranspiración del cultivo (mm; mm d ⁻¹)
ET _o	Evapotranspiración de referencia (mm; mm d ⁻¹)
ET _p	Evapotranspiración potencial (mm; mm d ⁻¹)
ET _x	Evapotranspiración máxima (mm; mm d ⁻¹)
EVI	Enhanced Vegetation Index
F	Frío
FST	Fecha de siembra típica
GDD	Grados-día desarrollo (° C)
GDDA	Grados-día desarrollo acumulados (° C)
GIS	Sistemas de información geográfica
GPS	Sistemas de posicionamiento global
HA	Humedad aprovechable (%; cm ⁻³ cm ⁻³)
HI	Índice de cosecha
HV	Humedad volumétrica del suelo (%; cm ⁻³ cm ⁻³)

Símbolo / acrónimo	Significado y unidades
HV _{act}	Humedad volumétrica actual (% , cm ⁻³ cm ⁻³)
IH	Índice de humedad
IR	Intervalo de riego (d)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático
Kc	Coefficiente de cultivo
LAI	Índice de área foliar
Lb	Lámina bruta (cm)
Ln	Lámina neta (cm)
MDP	Máximo déficit de humedad del suelo permitido (% , %/100)
MF	Materia fresca (t ha ⁻¹)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MR	Módulo (s) de riego
MS	Materia seca (t ha ⁻¹)
N	Neutro
NDVI	Índice Normalizado de Desarrollo de Vegetación
NMP	Número de mazorcas podridas
OI	Otoño-invierno
P	Precipitación (mm)
PA	Productividad del agua (kg m ⁻³)
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
Pe	Precipitación efectiva (mm)
PEC	Plantas enfermas por carbón
PER	Plantas enfermas por roya
PF	Peso fresco (g; kg)
PIB	Producto Interno Bruto
PLJ	Plantas sin mazorca
PMP	Punto de marchitez permanente (% , cm ⁻³ cm ⁻³)
PP	Precipitación pluvial (mm)
PR	Plan (es) de riego
Pr	Profundidad radical (m)
Pr _{máx}	Profundidad máxima de la raíz (m)
Pr _o	Profundidad inicial o de siembra (m)
PRONACOSE	Programa Nacional Contra la Sequía
PS	Peso seco (g; kg)
PSG	Peso seco del grano (g; kg)
PV	Primavera-Verano
Q	Gasto (m ³ s ⁻¹)
Qr	Gasto de riego (m ³ s ⁻¹)
R1, R2...R6	Fases reproductivas de maíz desde flor femenina (jilote) hasta madurez
RA	Riegos de auxilio
RR	Requerimiento de riego (mm, cm, m, m ³)
RS	Sensores remotos
S	Siembra
SAT	Saturación (% , cm ⁻³ cm ⁻³)
SPEI	Índice Estandarizado de Precipitación-Evaporación

Símbolo / acrónimo	Significado y unidades
SPI	Índice estandarizado de precipitación
SRL	Sociedad de Responsabilidad Limitada
T	Tratamiento (s)
t	Tiempo (s)
Td	Temperatura diurna (° C)
TDR	Time Domain Reflectometry
TES	Testigo
T _{máx}	Temperatura máxima del aire diaria (° C)
T _{med}	Temperatura media del aire diaria (° C)
T _{mín}	Temperatura mínima del aire diaria (° C)
Tn	Temperatura nocturna (° C)
Tr	Transpiración (mm; mm d ⁻¹)
UR	Unidad (es) de Riego
URL	Uniform Resource Locator
V1, V2, V3...VT	Hojas verdaderas de maíz desde la primera hasta la hoja bandera (VT)
VANTs	Vehículos aéreos no tripulados o drones
VB	Volumen bruto (m ³ x 10 ³)
VI,	Índice de vegetación,
VI _s	Índices de vegetación
WP	Productividad del agua (biomasa por unidad de transpiración acumulada)
Y	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Ya	Rendimiento actual (t ha ⁻¹)
Y _{EST}	Rendimiento estimado (t ha ⁻¹)
Y _{REST}	Rendimiento relativo estimado (%)
Y _X	Rendimiento máximo (t ha ⁻¹)
ZR	Zona (s) de riego
Δx	Diferencia relativa de una variable con respecto a otra
θ	Humedad del suelo (%; cm ⁻³ cm ⁻³)
θ _c	Humedad crítica del suelo (%; cm ⁻³ cm ⁻³)

APÉNDICE B

**ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE SUELO Y RIEGOS APLICADOS EN LOTE
EXPERIMENTAL CEVAF DURANTE LOS CICLOS OI 2017/2018 Y 2018/2019 PARA LA
CALIBRACIÓN DEL MODELO AquaCrop,**

Apéndice B1. Análisis físico-químico de suelo en lote experimental CEVAF, en los ciclos OI 2017/2018 y 2018/2019.

Variable	2017/2018		2018/2019		Unidad
	Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	
Arena	17.65	---	15.40	---	%
Limo	17.08	---	17.26	---	%
Arcilla	65.27	---	67.34	---	%
Clase textural	---	Arcillosa	---	Arcillosa	
Densidad aparente (Da)	1.15	---	1.15	---	g cm ⁻³
Capacidad de campo (CC)	0.513	---	0.525	---	cm ³ cm ⁻³
Punto de marchitez permanente (PMP)	0.357	---	0.367	---	cm ³ cm ⁻³
Humedad aprovechable (HA)	0.156	---	0.158	---	cm ³ cm ⁻³
Humedad a saturación (HS)	0.60	Muy alta	0.60	Muy alta	cm ³ cm ⁻³
Conductividad hidráulica a saturación (Ks)	1.2		1.2		cm d ⁻¹
Materia orgánica (MO)	0.91	Med. bajo	0.78	Bajo	%
pH	6.75	Muy lig. ácido	6.68	Lig. ácido	
Conductividad eléctrica (CE)	0.54	Bajo	0.34	Bajo	dS m ⁻¹
Nitrógeno (N-NO3)	23.00	Bajo	6.00	Muy bajo	ppm
Fósforo (P2O5)	56.00	Alto	36.00	Mod. alto	ppm
Potasio (K2O)	1392	Muy alto	1458	Muy alto	ppm

Apéndice B2. Riegos aplicados en lote experimental CEVAF ciclo OI 2017/2018

NR	Fecha	DDS	GDDA	Ln (mm)	R1 100	R2 80	R3 60	R4 40
1	20/12/17	0	0	148	228	228	228	228
2	26/01/18	38	284.22	23	26	20	15	10
3	02/02/18	45	347.16	8	9	7	5	4
4	09/02/18	52	422.64	11	12	10	7	5
5	15/02/18	58	480.56	12	13	11	8	5
6	21/02/18	64	538.14	15	17	13	10	7
7	26/02/18	69	563.92	15	17	13	10	7
8	02/03/18	73	588.62	10	11	9	7	4
9	05/03/18	76	614.79	12	13	11	8	5
10	09/03/18	80	648.5	17	19	15	11	8
11	12/03/18	83	684.73	12	13	11	8	5
12	16/03/18	87	727.97	21	23	19	14	9
13	19/03/18	90	757.07	14	16	12	9	6
14	23/03/18	94	798.64	27	30	24	18	12
15	26/03/18	97	833.92	16	18	14	11	7
16	30/03/18	101	869.54	20	22	18	13	9
17	03/04/18	105	915.53	34	38	30	23	15
18	09/04/18	111	985.81	40	44	36	27	18
19	16/04/18	118	1069.81	47	52	42	31	21
20	23/04/18	125	1155.07	45	50	40	30	20
21	30/04/18	132	1254.94	44	49	39	29	20
22	07/05/18	139	1357.25	37	41	33	25	16
TOTAL				480	533	427	319	213

R1, R2, R3 y R4 representan las láminas brutas aplicadas en cada tratamiento, considerando una eficiencia de aplicación (EA) del 90%. El primer riego representa el riego de germinación.

Apéndice B3. Riegos aplicados en lote experimental CEVAF ciclo OI 2018/2019

NR	Fecha	DDS	GDDA	Ln (mm)	R1 100	R2 80	R3 60	R4 40
1	03/12/2018	0	0.0	150	230	230	230	230
2	25/01/2019	53	434.6	43	48	38.4	28.8	19.2
3	01/02/2019	60	488.6	14	15	12	9	6
4	08/02/2019	67	567.0	18	20	16	12	8
5	15/02/2019	74	635.1	22	24	19.2	14.4	9.6
6	22/02/2019	81	697.1	23	25	20	15	10
7	01/03/2019	88	736.0	24	27	21.6	16.2	10.8
8	08/03/2019	95	793.4	35	39	31.2	23.4	15.6
9	15/03/2019	102	872.3	33	37	29.6	22.2	14.8
10	22/03/2019	109	940.7	42	47	37.6	28.2	18.8
11	29/03/2019	116	1013.8	45	50	40	30	20
12	05/04/2019	123	1092.1	46	51	40.8	30.6	20.4
13	12/04/2019	130	1177.2	42	47	37.6	28.2	18.8
14	19/04/2019	137	1260.0	43	48	38.4	28.8	19.2
15	26/04/2019	144	1352.5	38	42	33.6	25.2	16.8
16	03/05/2019	151	1448.2	31	34	27.2	20.4	13.6
TOTAL				499	554	443.2	332.4	221.6

R1, R2, R3 y R4 representan las láminas brutas aplicadas en cada tratamiento, considerando una eficiencia de aplicación (EA) del 90%. El primer riego representa el riego de germinación.

APÉNDICE C

ORTOMOSAICOS RGB GENERADOS A PARTIR DE IMÁGENES ADQUIRIDAS CON DRONE EN LOTE EXPERIMENTAL, PARA LA ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL DOSEL (CCi) DE MAÍZ REQUERIDO EN LA CALIBRACIÓN DE AQUACROP.

Apéndice C1. Imágenes RGB para estimación del dosel del cultivo (CCi) requerido en la calibración del modelo AquaCrop en maíz bajo riego deficitario. Lote CEVAF, ciclo OI 2017/2018.



Fecha: 09/02/2018
DDS: 52
GDDA: 422.6



Fecha: 22/02/2018
DDS: 65
GDDA: 542.5



Fecha: 14/03/2018
DDS: 85
GDDA: 707.1



Fecha: 18/04/2018
DDS: 120
GDDA: 1092.9



Fecha: 15/05/2018
DDS: 147
GDDA: 1483.6

Apéndice C2. Imágenes RGB para estimación del dosel del cultivo (CCI) requerido en la calibración del modelo AquaCrop en maíz bajo riego deficitario. Lote CEVAF, ciclo OI 2018/2019



Fecha: 14/01/2019
DDS: 43
GDDA: 369.0



Fecha: 28/02/2019
DDS: 88
GDDA: 729.9



Fecha: 01/04/2019
DDS: 120
GDDA: 1047.3

APÉNDICE D

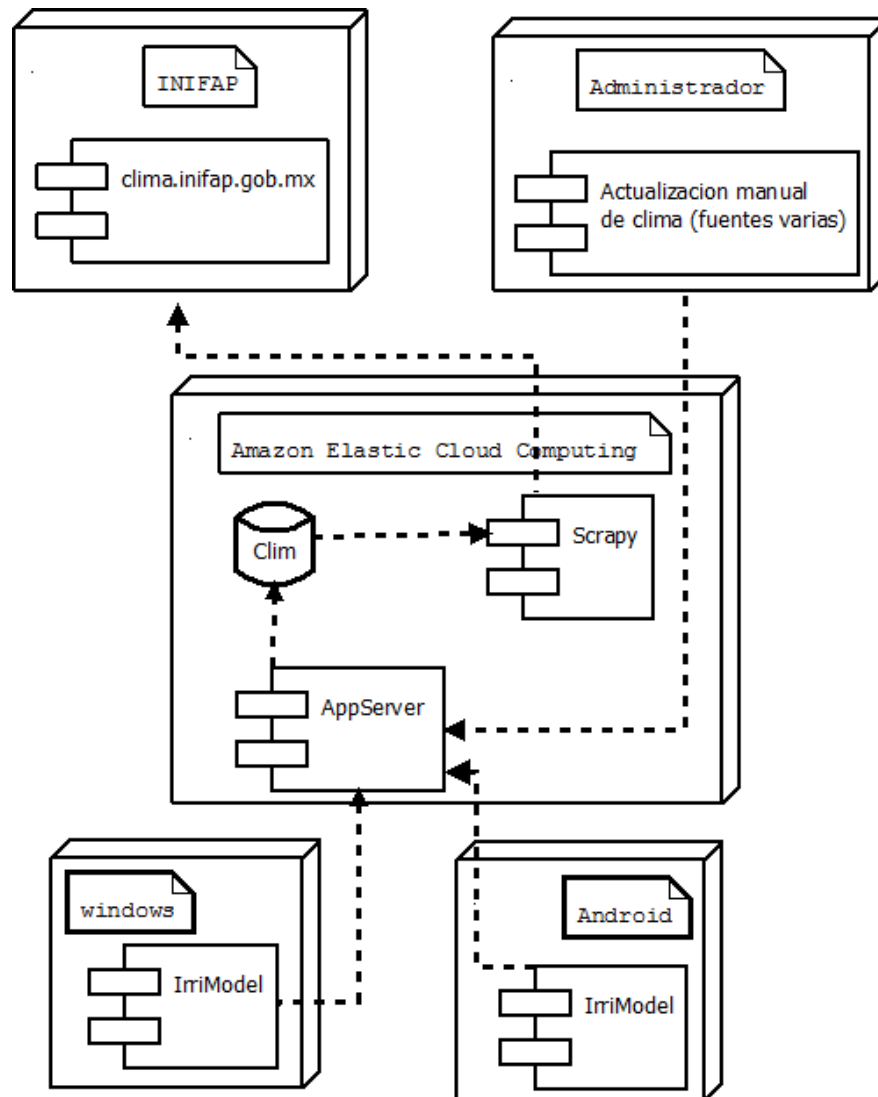
**RESPUESTA DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE PAPA AL DÉFICIT HÍDRICO,
MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA-INTEGRAL DEL RIEGO**

Apéndice D1. Resumen

El estado de Sinaloa establece anualmente el 22% de la superficie de papa (*Solanum tuberosum* L.) de México, con gran impacto económico y social. La calidad y cantidad de tubérculos están relacionados con el manejo eficiente del riego, si existe déficit hídrico durante la formación de tubérculos, el rendimiento disminuye significativamente. Una aplicación deficiente del riego también está asociada a la presencia de tubérculos deformes, agrietados y propensos al ataque de enfermedades provocadas por bacterias y hongos principalmente. En el presente estudio se evaluó el efecto de tres niveles de déficit hídrico generados a través del parámetro α_3 (0.15, 0.30 y 0.45) en el rendimiento y calidad de tres variedades comerciales de papa (FIANA, ÁGATA y ATLANTIC) en el norte de Sinaloa, México. Este parámetro pertenece a la función máximo déficit permitido (MDP) de un modelo integral de programación del riego basado en el concepto GDD. Se utilizó un arreglo en parcelas divididas donde las parcelas grandes fueron los niveles de estrés y las sub-parcelas las variedades. La aplicación de los riegos se controló con un sistema de riego por goteo. La variedad más sensible al déficit hídrico fue FIANA y la menos sensible fue ÁGATA. Un incremento en el déficit hídrico promovió la presencia de tubérculos deformes en las tres variedades mientras que los tubérculos enfermos y rezagas aumentaron en el nivel bajo. Aunque la humedad del suelo varió para los tres niveles de déficit hídrico, las láminas netas acumuladas fueron similares. Por otro lado, con el déficit hídrico bajo se tuvo la más alta productividad del agua en las tres variedades. Los resultados pueden ayudar para una mejor selección y manejo de sistemas de riego para cada variedad bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica.

Palabras Clave: *Solanum tuberosum*, L., grados día-desarrollo (GDD), calidad de tubérculos, eficiencia en el uso del agua.

Apéndice D2. Estructura de la Plataforma computacional basada en GDD para programación integral del riego de corto plazo y seguimiento de planes integrales.



APÉNDICE E

METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA DE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT

Apéndice E1. Calibración radiométrica de imágenes LANDSAT

La metodología para la calibración radiométrica de imágenes LANDSAT 5 y 7 fue la propuesta por Chander et al. (2009) los cuales aplicaron la ecuación (E1.1) para la calibración radiométrica y transformar los números digitales de cada banda a valores de radiancia:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calm\acute{a}x} - Q_{calm\acute{m}n}} \right) (Q_{cal} - Q_{calm\acute{m}n}) + LMIN_{\lambda} \quad (E1.1)$$

Donde:

- L_{λ} = radiancia de la banda espectral λ [$W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$]
- $LMAX_{\lambda}$ = radiancia espectral en el sensor que es escalada a $Q_{calm\acute{a}x}$ [$W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$] = 255 DN (número digital)
- $LMIN_{\lambda}$ = radiancia espectral en el sensor que es escalada a $Q_{calm\acute{m}n}$ [$W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$] = 1 DN (número digital)
- $Q_{calm\acute{a}x}$ = valor máximo cuantificado-calibrado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ [DN]
- $Q_{calm\acute{m}n}$ = valor mínimo cuantificado-calibrado correspondiente a $LMIN_{\lambda}$ [DN]
- Q_{cal} = valor cuantificado-calibrado del pixel [DN]

Los coeficientes $LMAX_{\lambda}$ y $LMIN_{\lambda}$ son constantes de calibración que se obtienen en el archivo de metadatos de cada imagen. La calibración atmosférica TOA (Top of Atmosphere) se realizó con la ecuación (E1.2) sugerida por los mismos autores.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s} \quad (E1.2)$$

Donde:

- ρ_{λ} = reflectancia planetaria TOA de la banda térmica [adimensional]
- π = constante matemática = 3.14159 [adimensional]
- L_{λ} = radiancia de la banda espectral λ [$W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$]
- d = distancia sol-tierra [unidades astronómicas]
- $ESUN_{\lambda}$ = irradiancia media exoatmosférica de la la banda media λ [$W / (m^2 \mu m)$]
- θ_s = ángulo solar Zenith [grados]

Para la calibración de las imágenes LANDSAT-8 (OLI/TRIS) se utilizó la metodología de la United State Geological Survey (USGS, 2019) donde los valores de radiancia absoluta (32-bit) son convertidos a valores integrados de 16-bit en el producto nivel-1 usando los factores de radiancia escalada del archivo metadato con la ecuación (E1.3).

$$L_{\lambda} = ML \cdot Q_{cal} + A_L \quad (E1.3)$$

Donde:

- L_{λ} = radiancia por banda espectral λ [$W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$]
- M_L = factor de escalada de radiancia multiplicativa para la banda, tomado del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_n)
- A_L = factor de escalada de radiancia aditiva para la banda, tomado del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_n)
- Q_{cal} = valor del pixel nivel-1 en DN

Similar que en el anterior, los valores integrados 16-bit en el producto nivel-1 pueden también ser convertidos a reflectancia TOA con la ecuación (E1.4).

$$\rho'_{\lambda} = M_p \cdot Q_{cal} + A_p \quad (E1.4)$$

Donde:

- ρ'_{λ} = reflectancia espectral planetaria TOA de la banda térmica sin corrección de ángulo solar [adimensional]
- M_p = factor de escalada de radiancia multiplicativa para la banda, tomado del metadato (REFLECTANCEW_MULT_BAND_n)
- Q_{cal} = Valor del pixel nivel-1 en DN
- A_p = factor de escalada de reflectancia aditiva para la banda, tomado del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_N)

Debido a que los valores ρ'_{λ} no tienen corrección de ángulo solar, esta puede realizarse con la siguiente ecuación (E1.5):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho'_{\lambda}}{\text{Sen}(\theta_{SE})} \quad (E1.5)$$

Donde:

- ρ_{λ} = reflectancia planetaria TOA
- θ_{SE} = ángulo local de elevación del sol al momento de la adquisición, tomado del metadato {grados}

Los valores digitales de la banda térmica TRIS pueden convertirse de radiancia espectral a temperatura de brillo en la superficie de la atmósfera la cual es la temperatura efectiva captada por el satélite asumiendo unidad de emisividad; la ecuación de conversión es la siguiente (E1.6):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (E1.6)$$

Donde:

- T = temperatura de brillo de la superficie de la atmósfera [K] donde:
- L_{λ} = radiancia de la banda espectral térmica TOA [$W / (m^2 sr \mu m)$]
- K_2 = constante de conversión de la banda específica térmica, tomado del metadato ($K1_CONSTANT_BAND_x1$ donde x es el número de banda térmica)
- K_1 = constante de conversión de la banda específica térmica, tomado del metadato ($K2_CONSTANT_BAND_x1$ donde x es el número de banda térmica)

Para los sensores de LANDSAT 5 y 7, $\lambda = 6$ mientras que para el sensor LANDSAT-8, $\lambda = 10$ o bien 11.