

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE NSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**LA MODELACIÓN BIOLÓGICA
CON FINES DE PLANEACIÓN DE
DISTRITOS DE RIEGO**

VLADIMIR RUIZ PEREZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada “**La Modelación Biológica con fines de Planeación de Distritos de Riego**”, realizada por el alumno: Vladimir Ruiz Pérez, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO _____
DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO

DIRECTOR
DE TESIS _____
DR. WALDO OJEDA BUSTAMANTE

ASESOR _____
DR. JUAN ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR _____
MC. ERNESTO SIFUENTES IBARRA

LA MODELACION BIOLOGICA CON FINES DE PLANEACION DE DISTRITOS DE RIEGO

Vladimir Ruiz Pérez

Colegio de Postgraduados, 2014

En la actualidad, la producción agropecuaria presenta, en muchos aspectos, niveles crecientes de incertidumbre cuando se analiza al sistema productivo en un contexto general. Más aún cuando, como en los últimos años, la innovación tecnológica ha vuelto al sistema más complejo y la economía o el clima han provocado un aumento de la variabilidad.

El inminente avance en el desarrollo de herramientas computacionales con aplicación a la agricultura, han ayudado en la utilización de modelos de simulación como una herramienta que ayuda a entender y analizar el funcionamiento de los sistemas de producción agrícola presentando diferentes alternativas de implementación en su manejo, estas herramientas constituyen un soporte a la hora de tomar decisiones de planificación, desarrollo y producción agrícola. Estos modelos utilizan información obtenida a través de experiencias anteriores y permite proyectar los resultados físicos y económicos teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente. Ante la variabilidad y complejidad de los sistemas de producción actuales, los modelos de simulación se presentan como una alternativa para ser empleados en los escenarios futuros.

La producción de los cultivos depende de la tasa de desarrollo de los procesos fisiológicos que ocurren en la planta, los cuales dependen en gran medida de las condiciones ambientales presentes. Basados en lo anterior, se deduce la dependencia que existe del sector agrícola al comportamiento de las variables climatológicas ya que la demanda evaporativa de la atmósfera define en gran medida la evapotranspiración de los cultivos, por lo que el utilizar como herramienta de apoyo la implementación de modelos de simulación de cultivos pueden mejorar la toma de decisiones para asignar recursos en tiempo y cantidad, al simular el desarrollo y respuesta de los mismos.

Los diferentes cultivos que se desarrollan en México, cada uno con su nivel de importancia correspondiente, no escapan a los cambios en los patrones climáticos

ocasionados por el calentamiento global, siendo afectado su desarrollo y productividad, a causa de esto, se requiere el uso de modelos para conocer la respuesta del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y condiciones climáticas.

En el presente trabajo se validó el modelo AquaCrop para simular el desarrollo de los cultivos de frijol y papa en el norte de Sinaloa, México, durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2011-2012. El modelo mostró un buen comportamiento para reproducir la fenología de estos lo cual genera condiciones para acoplar la aplicación de insumos con la fenología. Una vez validado el modelo, se simularon respuestas del cultivo bajo condiciones climáticas promedio de la región, diferentes fechas de siembra y niveles de estrés hídrico. Los resultados muestran que el modelo AquaCrop es una alternativa viable para determinar la respuesta de un cultivo bajo diferentes escenarios de manejo del riego y variabilidad climática.

Palabras clave: Modelo de simulación, requerimientos hídricos, fenología.

Dedico esta tesis a;

Mi esposa e hijo quienes me apoyaron en la culminación de mis estudios y son ellos los que más sacrificaron su tiempo al brindármelo.

A mis padres y hermanos quienes estuvieron ahí durante todo el proceso de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al colegio de posgraduados por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Al programa de Hidrociencias, personal académico y administrativo por el apoyo y facilidades otorgadas durante mi permanencia.

Al MC. Ernesto Sifuentes Ibarra por sus comentarios y sugerencias en la orientación del presente trabajo.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno por su atención y buena disposición en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Waldo Ojeda Bustamante por su dirección y apoyo, siendo fundamental para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Juan Enrique Rubiños Panta por su disposición y apoyo para la culminación de este trabajo.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| I. INTRODUCCION | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 4 |
| II. REVISION DE LITERATURA | 4 |
| 2.1. Descripción hidrológica de México | 4 |
| 2.2. Infraestructura hidroagícola en Sinaloa | 5 |
| 2.3. Distritos de riego | 9 |
| 2.3.1. Aspectos generales | 9 |
| 2.3.2. Distritos de riego del noroeste del país | 10 |
| 2.3.2.1. Infraestructura | 11 |
| 2.3.2.2. Situación actual | 11 |
| 2.3.2.3. Problemática | 11 |
| 2.3.3. Operación de distritos de riego | 12 |
| 2.3.3.1. Fases de la Operación. | 13 |
| 2.3.3.2. Plan de riegos. | 13 |
| 2.3.3.3. Ejecución | 14 |
| 2.3.3.4. Control | 14 |
| 2.4. Mejora del servicio y aplicación del riego | 14 |
| 2.4.1. Fenología de cultivos | 14 |
| 2.4.2. Factores asociados a la fenología de cultivos | 16 |
| 2.4.3. Cambio climático y acciones de adaptación | 17 |
| 2.5. Caracterización de cultivos | 18 |
| 2.5.1. Cultivo de frijol | 18 |
| 2.5.1.1. Impacto de la temperatura en el desarrollo del cultivo | 20 |
| 2.5.1.2. Requerimientos agroclimáticos | 21 |
| 2.5.1.3. Requerimientos hídricos | 21 |
| 2.5.1.3. Etapas fenológicas del cultivo de frijol | 21 |
| 2.5.2. Cultivo de papa | 24 |
| 2.5.2.1. Impacto de la temperatura en el desarrollo del cultivo | 26 |
| 2.5.2.2. Requerimientos agroclimáticos | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.5.2.3. Requerimientos hídricos | 28 |
| 2.5.2.4. Etapas fenológicas del cultivo de papa | 29 |
| 2.6. Modelos de simulación biológica | 32 |
| 2.6.1. Clasificación de modelos | 34 |
| 2.6.1.1. Descriptivos o empíricos | 35 |
| 2.6.1.2. Explicativos, teóricos o mecanistas | 36 |
| 2.6.2. Modelo de simulación biológica Aqua Crop | 38 |
| III. MATERIALES Y METODOS | 41 |
| 3.1. Localización y caracterización general de la zona de estudio | 41 |
| 3.1.1. Clima | 42 |
| 3.1.2. Orografía y suelo | 42 |
| 3.2. Diseño experimental | 42 |
| 3.3. Requerimientos del modelo AquaCrop | 43 |
| 3.3.1. Comparación de métodos de predicción de fenología | 45 |
| 3.4. Obtención de datos climáticos | 56 |
| 3.5. Parametrización del modelo | 57 |
| 3.5.1. Manejo agronómico | 57 |
| 3.5.2. Determinación de variables de crecimiento | 64 |
| 3.5.2.1. Seguimiento fenológico | 65 |
| 3.5.2.2. Seguimiento de crecimiento | 65 |
| 3.5.3. Programación de riegos | 65 |
| 3.6. Validación de parámetros conservativos calibrados | 66 |
| IV. RESULTADOS | 67 |
| 4.1. Parámetros obtenidos en campo | 67 |
| 4.1.1. Fenología de cultivos | 67 |
| 4.1.2. Producción de biomasa | 68 |
| 4.1.3. Calendarios de riego según el programa IrriModel 1.0 | 71 |
| 4.2. Parámetros conservativos ajustados | 72 |
| 4.3. Resultados de la validación del modelo para frijol y papa | 76 |
| 4.4. Aplicaciones del modelo | 77 |
| 4.4.1. Riego bajo condiciones óptimas de humedad | 77 |

| | |
|--|------------|
| 4.4.2. Estrés hídrico controlado y reducción del número de riegos | 79 |
| 4.4.3. Análisis de productividad del agua. | 82 |
| 4.4.4. Rendimiento y requerimientos de riego esperados en función de la fecha de siembra | 88 |
| V. CONCLUSIONES | 90 |
| VI. LITERATURA CITADA | 92 |
| VII. ANEXOS | 103 |
| LISTA DE FIGURAS | |
| Figura 1. Regiones hidrológicas de México | 5 |
| Figura 2. Cuencas hidrográficas ubicadas en el estado de Sinaloa. | 6 |
| Figura 3. Superficie establecida por agricultura de riego y temporal en Sinaloa. | 8 |
| Figura 4. Escala de desarrollo de una planta de frijol (CIAT 1983). | 23 |
| Figura 5 Fenología del frijol. | 24 |
| Figura 6. Desarrollo fenológico del cultivo de la papa. | 31 |
| Figura 7. Operación y lógica en la simulación utilizada por el modelo AquaCrop | 39 |
| Figura 8. Ubicación del Campo Experimental del Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP, ubicado en el norte de Sinaloa. | 41 |
| Figura 9. Distribución de las estaciones meteorológicas del estado de Sinaloa | 56 |
| Figura 10. Acumulación de biomasa para el cultivo de frijol | 69 |
| Figura 11. Acumulación de biomasa para el cultivo de papa | 70 |
| Figura 12. Productividad del agua obtenida en el cultivo de frijol. | 83 |
| Figura 13. Rendimiento obtenido en el cultivo de frijol | 84 |
| Figura 14. Lamina de agua aplicada al cultivo de frijol | 84 |
| Figura 15. Productividad del agua PW en el cultivo de papa. | 85 |

| | |
|---|----|
| Figura 16. Lámina neta requerida por la planta. | 86 |
| Figura 17. Rendimiento obtenido para el cultivo de papa. | 87 |
| Figura 18. Lamina bruta aplicada al cultivo de papa | 87 |
| Figura 19. Comparación de rendimiento de biomasa y cosecha para simulaciones bajo riego por goteo y superficial para frijol. | 88 |
| Figura 20. Comparación de rendimiento de biomasa y cosecha para simulaciones bajo riego por goteo y superficial para papa. | 90 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Ríos y presas de Sinaloa (CONAGUA, 2008). | 6 |
| Cuadro 2. Ecuaciones para la estimación diaria de °D | 16 |
| Cuadro 3. Información requerida por el modelo AquaCrop | 43 |
| Cuadro 4. Ecuaciones requeridas por el modelo AquaCrop para el cálculo de biomasa y producción de grano. | 43 |
| Cuadro 5. Información de las parcelas comerciales utilizadas. | 46 |
| Cuadro 6. Etapas fenológicas de la papa de acuerdo a Rowe (1993). | 47 |
| Cuadro 7. Métodos usados para el cálculo de °D en el cultivo de papa para el norte de Sinaloa. | 48 |
| Cuadro 8. Parámetros de dispersión utilizados para evaluar el desempeño de métodos. | 50 |
| Cuadro 9. Valores de DESV, CV e índice d para cada uno de los métodos. | 51 |
| Cuadro 10; Valores de MBE, Sd2, RMSE y MAE para cada uno de los métodos. | 52 |
| Cuadro 11. Valor en °D de cada una de las etapas fenológicas para el M6, M5 y M2. | 54 |
| Cuadro 12. Cuadro resumen que indica cual método obtuvo los mejores resultados por etapas en cada uno de los parámetros utilizados. | 54 |
| Cuadro 13. Requerimientos productivos del frijol en la zona norte del estado de Sinaloa | 57 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 14. Manejo agronómico del cultivo de frijol en la zona norte del estado de Sinaloa. | 59 |
| Cuadro 15. Requerimientos productivos de la papa en la zona norte del estado de Sinaloa. | 63 |
| Cuadro 16. Manejo Agronómico del cultivo de papa en la zona norte del estado de Sinaloa | 63 |
| Cuadro 17. Monitoreo fenológico del cultivo de frijol. | 67 |
| Cuadro 18. Monitoreo fenológico del cultivo de papa. | 68 |
| Cuadro 19. Sumario de riegos aplicados al cultivo de frijol. | 71 |
| Cuadro 20. Sumario de riegos aplicados al cultivo de papa. | 72 |
| Cuadro 21. Parámetros conservativos del cultivo de papa para condiciones del norte del estado de Sinaloa, basados en (Lima, 17May95). | 73 |
| Cuadro 22. Parámetros conservativos del cultivo de frijol para condiciones del norte del estado de Sinaloa, basados en (Patancheru, 25 junio 96). | 75 |
| Cuadro 23. Datos obtenidos del experimento vs validación en AquaCrop para el cultivo de papa | 76 |
| Cuadro24. Datos obtenidos del experimento vs validación en AquaCrop para el cultivo de frijol | 77 |
| Cuadro 25. Simulación realizada al cultivo de papa sin estrés hídrico. | 78 |
| Cuadro 26. Simulación realizada al cultivo de frijol sin estrés hídrico. | 79 |
| Cuadro 27. Reducción de lámina de riego con aplicación de 4 riegos complementarios. | 80 |
| Cuadro 28. Reducción de lámina de riego con aplicación de 3 riegos complementarios. | 80 |
| Cuadro 29. Simulación bajo riego por gravedad (2 riegos complementarios). | 81 |
| Cuadro 30. Simulación bajo riego por gravedad (1 riego complementario).82 | |

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más graves que deberá enfrentar el mundo en los próximos años es la escasez de agua, incluso en regiones que en la actualidad son relativamente menos afectadas, como América latina. Dentro de los problemas de las inminentes acciones que deberían tomarse para revertir o aminorar los efectos de esta situación, destaca la oposición que los gobiernos presentan a priorizan la implementación de medidas a largo plazo que, por definición, según estos, no dan réditos políticos inmediatos. Expertos de la Comisión del Agua de la UNESCO advierten que la demanda para el año 2025 será un 56% superior al suministro.

Aunque América latina resulte, en términos relativos, menos afectada que otras áreas, diversas zonas recibirán un impacto negativo no desdeñable. En el mundo cerca de 80 países, los cuales representan el 40% de la población global, padecen penurias serias por el recurso agua y aproximadamente el 20% de la superficie cultivada mundialmente es bajo riego (Walker y Skogerboe, 1987). La disponibilidad temporal irregular de agua también ha sido un problema mundial aún en zonas de alta precipitación (Wanjura y Upchurch, 2000).

En el caso de México las grandes zonas de riego se ubican en regiones áridas y semiáridas que requieren de una adecuada regulación y distribución del agua, por ser un bien escaso y vital para asegurar una producción agrícola económicamente viable (Flores-Gallardo *et al.*, 2007), por lo que si no se toman medidas a tiempo, la región norte soportará un estrés hídrico bajo en las próximas décadas y es esta zona del país la que provee la mayor cantidad de cosecha de los principales cultivos que se establecen (frijol, maíz, papa, etc.)

Particularmente el cultivo de frijol ocupa un lugar importante en la economía agrícola del país, tanto por la superficie que se le destina, como por la derrama económica que genera. En conjunto con el maíz constituyen la dieta básica del pueblo mexicano y en consecuencia son los productos de mayor importancia socioeconómica.

Su producción está orientada a satisfacer la demanda nacional, ya que el consumo de esta leguminosa ocupa un lugar importante dentro de la dieta diaria en las familias mexicanas.

El estado de Sinaloa es uno de los principales productores de granos básicos en México ocupando el segundo lugar en producción a nivel nacional después de Zacatecas con el 14.2% en 2008 y con un volumen de 0.15 millones de toneladas (SIACON,. 2010).

El frijol ocupa el segundo lugar de importancia en la economía agrícola del estado, solo después del maíz en cuanto a la producción se refiere. Durante el ciclo de Otoño-Invierno 2009-2010, se cosechó una superficie, de 137,685ha; 134,328 hectáreas en condiciones de riego, con un rendimiento medio de 1.67 ton ha^{-1} , así como 3 mil 357 3,357 hectáreas establecidas en temporal con una producción de 660 kg ha^{-1} . La producción global obtenida ascendió a 123 mil 507 toneladas. El rendimiento medio estatal fue de $1,640 \text{ kg ha}^{-1}$. (SIACON,. 2010)

La zona norte del estado es la principal productora de frijol y este enfrenta una serie de factores limitantes de producción, entre los que destacan los efectos causados por la variabilidad climática. Además, en muchos casos se desconoce la adecuada implementación de algunos componentes tecnológicos de producción, como el uso y manejo del agua de riego.

En cuanto al cultivo de papa, China se ha convertido en el primer productor mundial, y poco menos de una tercera parte de la producción se cosecha en este país y la India. Asia consume casi la mitad del suministro mundial de papa, debido a su enorme población ya que el consumo por persona es de apenas 24 kilogramos (kg) en 2005. Los mayores consumidores de papa son los europeos (87.8 kg) y norteamericanos (60 kg). El consumo más bajo es en África (14 kg) y América Latina (20.7kg), pero este va aumentando.

México, en el año de 1960 producía anualmente alrededor de 300 mil toneladas, y había una productividad inferior a 6 ton ha^{-1} . En la década de los ochenta, la producción se amplió a las zonas comerciales de regadío del norte y el occidente del país, donde la producción hoy alcanza las 40 ton ha^{-1} . En el 2007 hubo una cosecha extraordinaria de 1.67 millones de toneladas (SIAP 2013). El consumo per cápita de papa en México es de 17 kg, por lo que las importaciones provenientes de Canadá y Estados Unidos no han dejado de aumentar en los últimos años, y en 2007 llegaron a 70 mil toneladas de papa fresca y 122 mil toneladas de productos congelados.

La papa es uno de los pocos cultivos que se desarrollan en casi todo el país, se produce actualmente en 23 estados de la República Mexicana, los principales estados productores por orden de importancia son: Sinaloa con el 23% de la producción nacional, seguido de Sonora (20%), estado de México (9%), Veracruz (8%), Puebla (7%), Nuevo León (7%), Chihuahua (6%), Jalisco (3%), Chiapas (3%), Michoacán (3%) y Guanajuato (3%), estos 11 estados concentran el 92 de la producción nacional, en tanto que los restantes 12 estados sólo producen el 8% de la producción (SIAP 2013)..

En Sinaloa, al igual que en las principales zonas productoras del país, el cultivo de papa afronta grandes desafíos, destacando como principales problemas el adicionamiento del riego ya que este cultivo presenta una alta susceptibilidad tanto al exceso como al déficit hídrico, los requerimientos térmicos para el crecimiento del cultivo de la papa son: Temperatura mínima de $7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, máxima de $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo la temperatura óptima de $15\text{-}20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para que la planta realice la fotosíntesis adecuadamente, por lo que la variabilidad climática presente en la zona norte y en general todo el estado de Sinaloa influye en el desarrollo fenológico del cultivo.

Un buen cultivo de papas requiere en promedio de 400 a 800 milímetros de agua dependiendo de las condiciones climáticas y de la duración del período vegetativo (Haverkort, 1986). Al respecto Bosnjak y Pejlik (1996), reportan necesidades que varían entre 460 y 480 milímetros, en tanto que Klassen *et al.* (2001), señalan que para la obtención de buenos rendimientos y dependiendo de las condiciones climáticas de la

zona, el cultivo de papas necesita de aproximadamente 455 milímetros de agua por temporada. Lo anterior concuerda con lo señalado por Doorembos y Kassam (1979), quienes señalan que para lograr altos rendimientos en variedades cuyos ciclos sean de 120 a 150 días, los requerimientos hídricos son de 500 a 700mm por temporada, dependiendo del tipo de clima.

De acuerdo a lo anterior, estos cultivos presentan grandes potenciales productivos, necesarios para cubrir en cierta parte la demanda del país, una amenaza que atenta contra el buen desarrollo y obtención de niveles máximos de producción, son los cambios o variabilidad climática, suscitados con mayor presencia en los últimos años. Cada cultivo se desarrolla bajo ciertas condiciones de clima y requerimientos tanto de nutrientes como hídricos. Como ya se menciona, una herramienta capaz de aminorar los efectos del cambio climático son los sistemas de modelación de cultivos, los cuales son capaces de planificar de manera tal que, estos efectos no ocasionen mayores problemas a lo largo del ciclo del cultivo.

1.2. OBJETIVOS

Parametrización de cultivos

Comparación de métodos de predicción de fenología usando tiempo térmico

Calibración del modelo AquaCrop en cultivos de importancia del Valle del Fuerte

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Descripción hidrológica de México

De acuerdo con los trabajos realizados por la CONAGUA, el INEGI y el INE, se han identificado 1471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales, por su importancia y para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales, se han agrupado y/o subdividido en 722 cuencas hidrológicas, las cuales se han agrupado en 37 grandes regiones hidrológicas (**Figura 1**). El estado de Sinaloa se encuentra dentro de la Región Hidrológica Número 10, con 21 cuencas hidrológicas. El volumen total concesionado en la región es de 10,376.5 millones de m³, con 93.2 % del volumen para uso agrícola. (INEGI, 2005).



Figura 1. Regiones hidrológicas de México

2.2 Infraestructura hidroagropecuaria en Sinaloa

Para fines de administración del agua de la CONAGUA, el estado de Sinaloa se ubica en su totalidad en la Región Hidrológica 10, Pacífico Norte. En la **Figura 2** se presentan las cuencas hidrológicas de los ríos del estado de Sinaloa, entre los cuales destacan los ríos: Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Pericos, Culiacán, Rosa morada, Bejuco, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio y Baluarte.

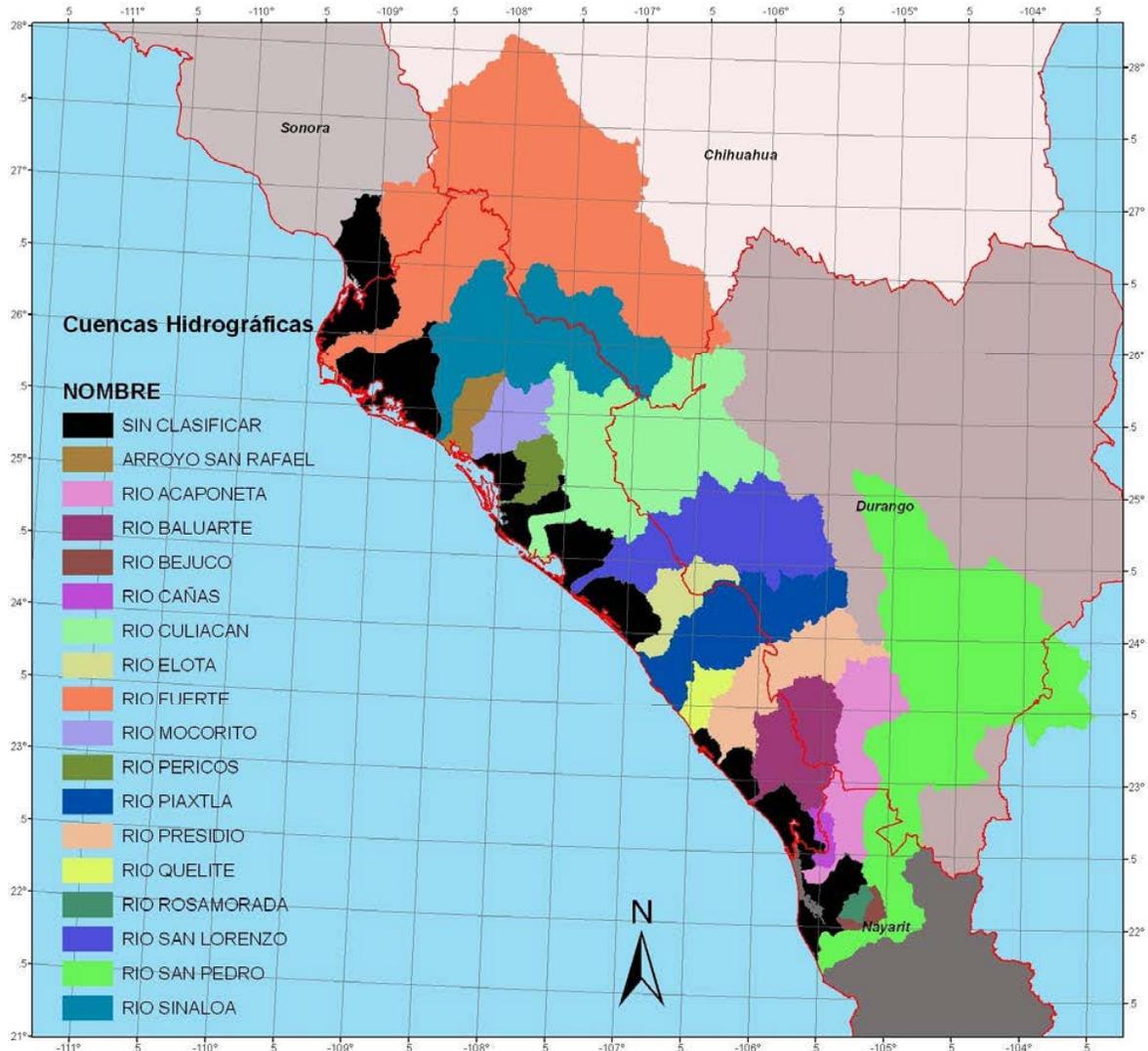


Figura 2. Cuencas hidrográficas ubicadas en el estado de Sinaloa.

En el **Cuadro 1** se muestra información más detallada de las diferentes cuencas hidrográficas ubicadas a lo largo y ancho del estado de Sinaloa: ríos, longitud de ríos, presas, capacidad y municipios que abarca cada cuenca hidrográfica (CONAGUA, 2008).

Cuadro 1. Ríos y presas de Sinaloa (CONAGUA, 2008).

| Río | Longitud (km) | Municipios | Presa | Capacidad (hm ³) |
|------------|---------------|--------------------------|----------------|------------------------------|
| Río Fuerte | 670 | Choix, El Fuerte y Ahome | Miguel Hidalgo | 3,038 520 |

| | | | | |
|-------------------------|-----|--|---|--------------|
| | | | (El Mahone) Josefa Ortiz Luis Donald Colosio (Huites) | 4,568 |
| Río Sinaloa | 420 | Sinaloa y Guasave | Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato) Guillermo Blake (El Sabinal) | 1,920 300 |
| Río Mocorito | 108 | Mocorito, Salvador Alvarado y Angostura | Eustaquio Buelna | 151 |
| Río Humaya | 280 | Badiraguato, Culiacán y Navolato | Adolfo López | 3,153 |
| Río Tamazula | 280 | | Mateos | 843 |
| Forman: Río Culiacán | 72 | | (Varejonal) Sanalona Vinoramas | 102 |
| Río Elota | 221 | Cosalá y Elota | Aurelio Benassini (El Salto) | 415 |
| Río Baluarte | 155 | Rosario | | |
| Río Quelite | 110 | San Ignacio y Mazatlán | | |
| Río San Lorenzo | 156 | Cosalá y Culiacán | José López Portillo (Comedero) | 2,250 |
| Río Presidio | 167 | Mazatlán | | |
| Río Piaxtla | 203 | San Ignacio | | |
| Río Cañas | 72 | Escuinapa | | |

La actividad económica se sustenta principalmente en la agricultura, la cual es la más tecnificada del país desde la década de los 60's. Lo mencionado anteriormente es resultado de que Sinaloa cuenta con la mayor superficie regable del país con alrededor de 800 mil ha así como varios de los distritos de riego más productivos resultado de la infraestructura hidro-agrícola existente (CONAGUA, 2009). Su alta productividad en diversos cultivos le permite participar en los mercados internacionales fungiendo como exportador de productos frescos entre los que destacan las hortalizas y frutales, los cuales representan más del 65% de las exportaciones totales que realiza Sinaloa (SIACON, 2008). La siguiente figura (**Figura 3**) muestra la superficie establecida por agricultura de riego y temporal en Sinaloa.

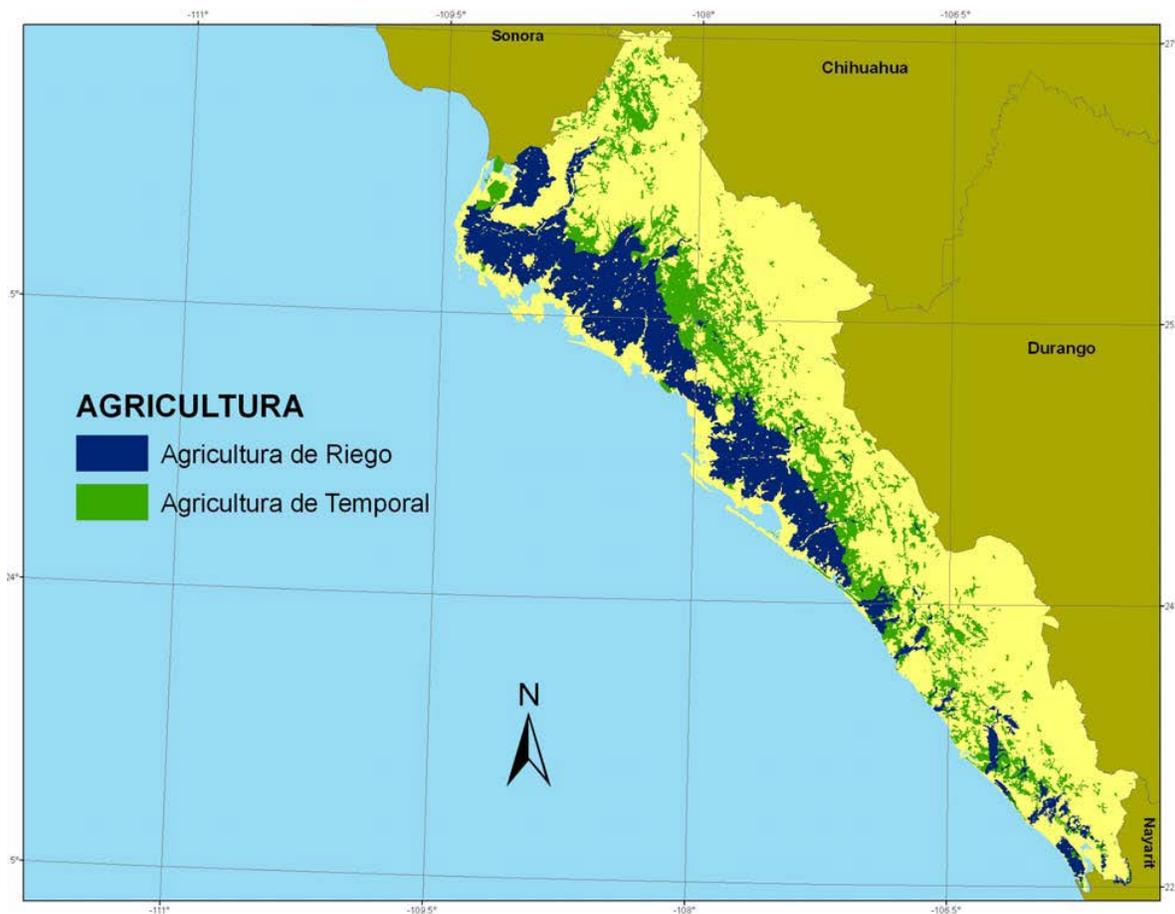


Figura 3. Superficie establecida por agricultura de riego y temporal en Sinaloa.

2.3. Distritos de riego

2.3.1. Aspectos generales

Un distrito de riego es el establecido mediante decreto presidencial el cual está conformado por una o varias superficies previamente delimitadas y dentro de cuyo perímetro se ubica una zona de riego el cual cuenta con las obras de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y del subsuelo, así como con sus vasos de almacenamiento, su zona federal de protección y demás bienes y obras conexas pudiendo establecerse también con una o varias unidades de riego (CONAGUA, 2004). Por su parte Palacios, (1981) dice que los distritos están constituidos por tres tipos de obras: las de riego, las de drenaje y las vías o caminos. Las primeras tienen por objeto llevar el agua de la fuente de abastecimiento a los cultivos, la segunda su función es extraer los excesos de agua tanto superficial como subterráneas, así como las sales que ésta trae en solución y por último, los caminos son indispensables para la movilización del personal y equipo de operación y de los usuarios.

En México se cuenta con 6.4 millones de ha de riego mismas que están dentro de 85 distritos de riego distribuidos en el país, existen 39,500 Unidades de Riego, de los 6.4 millones de ha el (53%) está orientada a la Agricultura comercial, mercado nacional y a la exportación y el resto 47% se destina principalmente a los mercados locales y regionales. Los distritos de riego del noroeste de México son el principal factor de desarrollo económico de estas regiones; bajo condiciones de baja disponibilidad de agua, se requiere de una estrategia integral del manejo que permita mejorar su productividad, y esté enfocada en tecnologías adaptables a las condiciones de cada distrito. Dicha estrategia debe iniciar con la elaboración de un plan de riegos, usando información relevante y confiable que permita analizar diferentes escenarios y prever conflictos bajo condiciones de baja disponibilidad. Posteriormente, se debe implementar dicho plan y monitorear su operación.

2.3.2. Distritos de riego del noroeste del país

A pesar de que los distritos de riego (DR) del noroeste de México han recibido apoyos por el estado para la modernización y rehabilitación de canales, tecnificación parcelaria y modernización de pozos, no ha tenido los impactos esperados en ahorro y aprovechamiento de agua (CONAGUA, 2009). En estas regiones el riego por gravedad es la técnica más usada que representa el 85% de la superficie, el 10% por aspersión y solo el 5% por goteo.

El plan de cultivos típico del DR-075 indica que 11.7 % de la superficie tiene cultivos perennes (PER) y 88.3 % cultivos anuales, de estos 80 % es de ciclo otoño-invierno (OI) y 20 % de segundos cultivos de ciclo primavera-verano (PV). El porcentaje de la superficie sembrada por cultivo y por ciclo es 65.9 % *Zea mays* (maíz), 19.5 % *Phaseolus vulgaris* (frijol), 6.7 % *Solanum tuberosum* (papa), 4.1 % *Solanum lycopersicum* (jitomate) y 3.9 % con otros cultivos en el OI. En el ciclo PV, hay segundos cultivos de superficie sembrada en OI: *Sorghum bicolor* (sorgo, 64.6 %), maíz (33.8 %) y otros cultivos (1.6 %). Los cultivos perennes son *Saccharum officinarum* L. (caña de azúcar) con 62.3 %, forrajes (principalmente *Medicago sativa*, alfalfa) con 19.8 %, y frutales (principalmente *Mangifera indica*, mango) con 17.9 % (Ojeda *et al.*, 2011).

Los módulos de riego son clave en la administración y uso eficiente del agua en la región por lo tanto es fundamental su constante capacitación y adopción de prácticas y tecnologías que contribuyan en el desarrollo sustentable de la agricultura.

Durante el ciclo O-I 2012-2013 las condiciones de baja disponibilidad de agua alentaron a los módulos de riego del DR 075 y con el apoyo del CEVAF-INIFAP utilizaron el programa IrriModel complementado con técnicas que mejoran la aplicación de riegos y de esta manera cumplir con los riegos asignados y al mismo tiempo formar conciencia entre los productores en el cuidado del agua. Actualmente se tienen eficiencias de aplicación del riego en el cultivo de maíz del 45% es decir que de cada 100 litros que se aplican en el riego solo 45 litros se queda en la zona de las raíces esto provoca la baja eficiencia de fertilizantes como nitrógeno así como erosión y pérdida de nutrientes del suelo por percolación (Sifuentes *et al.*, 2013).

2.3.2.1. Infraestructura

Los Distritos de Riego cuentan con obras de infraestructura que facilitan su operación empezando con las presas de almacenamiento las cuales son las principales obras de infraestructura en esta cadena siguiendo con las presas derivadores y las plantas de bombeo, en cuanto a red de conducción y distribución se cuenta con canales revestidos, canales sin revestir y estructuras, la red de drenajes se utiliza para el desfogue de excesos de agua causados por lluvias o captando el agua de los mismos drenajes parcelarios, la red de caminos con la que se cuenta y están a cargo sirven principalmente para llegar a cada uno de los lotes de siembras mismos que están ubicados a los costados de los drenes y canales o ramales.

2.3.2.2. Situación actual

Si bien, en los últimos años ha habido una preocupación por mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego parcelario, el esfuerzo resulta inconcluso si no se utilizan los medios adecuados y se combinan con el nivel tecnológico actual (desarrollo de la informática y electrónica, el avance científico en las áreas de física de suelos, fisiología vegetal y agro-climatología). La toma de decisiones sobre la planeación de las actividades de un Distrito de Riego y sus Módulos debe apoyarse en el conocimiento y análisis de la información que se genera en éstos, con la finalidad de aprovechar al máximo los recursos disponibles. Las actividades que se realizan en las diversas áreas técnicas de los distritos y módulos de riego, se programan y ejecutan de acuerdo con dos tipos de información: estadística (estadísticas agrícolas, hidrometría, plan de riegos) y planos temáticos. En el manejo del distrito de riego como un sistema de producción, es necesario considerar tres horizontes de tiempo: 1) Desarrollo histórico (evaluación), 2) Manejo en tiempo real (operación) y 3) Proyección de posibles cursos de acción (planeación) (Mejía et., al., 2003)

2.3.2.3. Problemática

La sequía es un fenómeno que tiene efectos negativos sobre la agricultura, en especial incide en la agricultura de riego, pues la mayor parte del tiempo no se maneja adecuadamente el agua de las presas. En ellas se utiliza el agua indiscriminadamente,

lo cual tiene un costo considerable, ya que el valor producido por el agua que se extrae en volúmenes mayores que la disponibilidad media de las cuencas, es mínimo, comparado con el que podría producir si ese volumen se guardara para épocas de escasez (Mejía-Saenz *et al.*, 2003). De esta manera y como mencionan Cruz-León y Bielsa- Callau (2001), los problemas de baja eficiencia de riego a nivel parcela y la falta de flexibilidad en la distribución deben encaminarse a la implantación de sistemas más eficientes de aplicación de agua en parcela y al conocimiento de la demanda hídrica (su cantidad y distribución en el tiempo). En general, el incremento de la eficiencia de riego puede elevar la cantidad de agua disponible y utilizarla para cubrir las necesidades hídricas de la zona de riego.

2.3.3. Operación de distritos de riego

La operación de los distritos de riego se ha fundamentado, principalmente en reglas empíricas que se han obtenido con base en la experiencia acumulada por el personal que los opera. Su aplicación no ha permitido optimizar el uso de los recursos agua, tierra, capital y personal disponibles en los distritos del país. Aunque la concepción de manejo eficiente del agua en los distritos de riego es conceptualmente simple, en la práctica afronta muchos problemas colaterales de diversa índole (cultural, social, económico, y tecnológico); el resultado conjugado se manifiesta en bajas eficiencias en el uso del agua.

Uno de los factores que más afecta la eficiencia, es el procedimiento utilizado para determinar los volúmenes de agua a operar; las razones principales que afectan su estimación son:

- El servicio de riego se programa prioritariamente en función de la facilidad en el manejo hidráulico de la red de distribución y no en las necesidades de agua de los cultivos.
- Cuando se toman en consideración los cultivos, la planeación se efectúa estimando las necesidades hídricas en base a estimaciones generales del uso consuntivo de los cultivos, y no se toman en cuenta factores fundamentales como el suelo y su variabilidad espacial, y las condiciones meteorológicas.

- La programación se efectúa por la demanda de los usuarios, esta obedece más bien a factores de tipo tradicional o simplemente a la apreciación empírica y subjetiva de necesidad de regar.
- Aunque la naturaleza del problema es conocida, preocupa que las causas se han asimilado como males necesarios, y así se habla de eficiencias de aplicación normales de 60 por ciento; este dato, más que indicar la eficiencia, refleja graves problemas.

2.3.3.1. Fases de operación

Una de las fases de operación es la estimación de la disponibilidad del agua misma que se realiza con técnicas de análisis estadísticos y de probabilidad de los fenómenos hidro-meteorológicos y capacidad de los acuíferos, la estimación de la demanda de agua se realizan en base a los requerimientos de riego de los cultivos, estadísticas de láminas aplicadas, etc.

2.3.3.2. Plan de riegos.

Para la elaboración del plan de riegos se requiere efectuar un balance entre los volúmenes de agua disponibles y los necesarios para regar los cultivos durante el año agrícola, tomando en cuenta la forma más conveniente de hacer un uso más eficiente del agua. A continuación se muestra el contenido de un plan de riego.

- **Plan de cultivos.** Se refiere a los diferentes cultivos que se establecerán en el ciclo ya sea otoño-invierno o primavera-verano

La periodicidad con que se regarán los cultivos se refiere a la programación tentativa de acuerdo a las fechas de siembra establecidas de cuándo será la demanda de riegos también basados en las etapas críticas de dichos cultivos.

- **Láminas de riego para cada cultivo.** Se establece una lamina aproximada de cada cultivo misma que también se utiliza para fijar la cuota para cada cultivo, basándose en los volúmenes necesarios para suministrar la humedad requerida durante el desarrollo vegetativo, de acuerdo al requerimiento hídrico de cada cultivo se programa un volumen aproximado de agua que asegure el desarrollo óptimo del cultivo.

- **Funcionamiento de la(s) fuente(s) de abastecimiento.** El buen funcionamiento y constante mantenimiento de las redes de conducción aseguran la provisión de agua en tiempo y forma.

2.3.3.3. Ejecución

Programación de riego. Para la programación de los riegos en los DDR es necesario conocer la demanda semanal, cada 24 hrs, existiendo también demanda libre y la distribución por tandeos, aunque estas dos últimas no son utilizadas en esta zona.

2.3.3.4. Control

Medición del agua. La medición del agua se realiza en las fuentes de abastecimiento, puntos de control de entrega (SRL, ACU) y entrega a usuarios (estimación).

Regulación de Red de Distribución. La regulación se realiza con controles Aguas arriba, realizando revisiones en control de fugas y teniendo una adecuada programación. La generación de estadísticas hidro-agrícolas ayuda a una buena regulación de la red de distribución.

Evaluación. Una buena evaluación requiere un seguimiento del desarrollo del plan de riegos (semanal, decena, mensual), tener un control de volúmenes utilizados y disponibles, conocer la eficiencias de conducción, productividad del agua, productividad de la tierra, recaudación y contar con una autosuficiencia financiera.

2.4. Mejora del servicio y aplicación del riego

2.4.1. Fenología de cultivos

La fenología de un cultivo comprende el estudio de las etapas o eventos que forman el ciclo de vida de las plantas. La fenología usualmente se define como la distribución estadística de algunos parámetros que se utilizan para medir el crecimiento de la planta, así como el momento de ocurrencia de una determinada etapa, su duración, su sincronía con otros eventos y la simetría de la curva de la distribución para cada estimador de los parámetros estimados. La duración de los ciclos de vida o desarrollo de los cultivos depende de la especie y de las condiciones físicas y ambientales donde se desarrolle cada cultivo (Bolaños, 2001). El principal objetivo de la fenología es reunir

información sobre el inicio, la culminación, la conclusión y la duración de cada etapa y correlacionar informaciones con los factores y elementos ambientales.

El conocimiento de la fenología de los cultivos y la posibilidad de predicción facilitan la toma de decisiones en el manejo agronómico del cultivo. De esta manera, el manejo del riego, la fertilización o el control de plagas y enfermedades serán más eficientes en función de la edad fisiológica del cultivo, determinada por las condiciones ambientales (Sifuentes *et al.*, 2009).

Siendo la temperatura el factor que actúa principalmente sobre el desarrollo de los cultivos, un incremento en la temperatura ambiental puede afectar su tasa de crecimiento, limitar su actividad fotosintética y aumentar su respiración (Ellis *et al.*, 1990; Lawlor, 2005). O sea que el acortamiento del ciclo puede reducir el rendimiento potencial de cultivos, al reducirse el periodo de intercepción de la radiación, que es precisamente uno de los principales determinantes de la acumulación de materia seca y rendimiento (Monteith, 1981).

La calendarización científica del riego basada en la fenología ha sido exitosamente aplicada al acoplar en forma óptima la oferta con la demanda hídrica de los cultivos y aumentar la productividad y eficiencia de agua (Kar y Verna, 2005). Esta metodología ha sido aplicada en México para calendarizar el riego en el cultivo de papa por Ojeda B., *et al.*, (2004), así como también se han utilizado para estimar las demandas nutricionales del cultivo de papa (Sifuentes *et al.*, 2009).

Diversas variantes han sido reportadas para estimar el tiempo térmico. A pesar de los desarrollos tecnológicos para monitorear en tiempo “casi real” las variables meteorológicas, la mayoría de los métodos de estimación de tiempo térmico han sido desarrollados para valores promedios diarios (Villordon *et al.*, 2009).

La edad fisiológica de un cultivo es producto de la edad cronológica y de los antecedentes ambientales de este, para medir la edad fisiológica se utiliza a menudo la acumulación °D relacionada con la aparición de cada fase de desarrollo, las cuales difieren para cada variedad (Jefferies, 1991).

Los °D son las unidades que miden el calor que la planta recibe cada día, mismo que se acumula a lo largo de su desarrollo (Alonso, 2002). La estimación diaria de estos requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria (T_a) de acuerdo con las siguientes ecuaciones que se presentan en el **Cuadro 2** (Ojeda *et al.*, 2006).

Cuadro 2. Ecuaciones para la estimación diaria de °D

$$^{\circ}\text{D} = T_a - T_{c\text{-min}}, \text{ si } T_a < T_{c\text{-max}}$$

$$^{\circ}\text{D} = T_{c\text{-max}} - T_{c\text{-min}}, \text{ si } T_a \geq T_{c\text{-max}}$$

$$^{\circ}\text{D} = 0, \text{ si } T_a \leq T_{c\text{-min}}$$

Donde $T_{c\text{-min}}$ y $T_{c\text{-max}}$ son las temperaturas umbrales del cultivo.

Diversos modelos, principalmente lineales, han sido ampliamente utilizados para predecir los cambios en la fenología de los cultivos en función del tiempo térmico (Lallukka *et al.*, 1978). El método estándar basado en la temperatura promedio es el método más utilizado para estimar los °D (Dufault, 1997). Sin embargo se han reportado en la literatura métodos que utilizan mas parámetros como (Sands *et al.*, 1979) que reporta el método P-Days. Otros trabajos realizados en la comparación de métodos para estimar la fenología basado en °D ha sido reportada por (Villordon *et al.*, 2009).

2.4.2. Factores asociados a la fenología de cultivos

Los factores ambientales más importantes que definen la producción de un cultivo son la radiación solar, la temperatura, y el bióxido de carbono. Estos tres elementos junto con las características del cultivo (fisiología, fenología, arquitectura y genotipo) son lo que definen el máximo potencial productivo de una zona agrícola. El siguiente nivel productivo lo definen los factores limitantes agua y nutrientes. Mientras que el primer nivel que define al estado actual productivo lo definen los factores reductores asociados con las malezas, plagas, enfermedades, mercado, desastres naturales y contaminación del ambiente donde se desarrollan los cultivos.

Estudiar el impacto de los factores ambientales en un lugar está relacionado con estudiar los factores que restringen su desarrollo y productividad; para lo cual es necesario revisar la ley del mínimo, formulada independientemente por los científicos

Liebig y Sprengel (Van Der *et al.*, 1999), que establece que el rendimiento de un cultivo está delimitado por el elemento o factor restrictivo, sin importar que los demás estén en plenitud. Los cultivos no se adaptan a las condiciones medias de sus hábitats, sino a las condiciones mínimas para el mantenimiento de la vida.

El crecimiento está limitado no tanto por la abundancia de cada uno de los factores necesarios, sino por la disponibilidad mínima de cualquiera de ellos.

2.4.3. Cambio climático y acciones de adaptación

La agricultura ha venido evolucionando y en muchos casos ha logrado adaptarse a las condiciones climáticas locales y a su variabilidad natural. Sin embargo en la actualidad, la sociedad, y en particular el sector agrícola, enfrenta cambios potencialmente mucho más rápidos en las condiciones climáticas futuras debido a actividades humanas que afectan tanto la composición de la atmósfera como el balance de la radiación solar. Este fenómeno de calentamiento global de la superficie terrestre es una de las grandes amenazas del presente siglo.

Existen evidencias de que como parte del cambio climático, los flujos térmicos de la atmósfera se están modificando debido a un incremento en la acumulación atmosférica de varios gases de efecto invernadero, cuyo origen es antrópico (IPCC, 2007). Así, las proyecciones futuras indican un incremento global significativo tanto de la temperatura como del bióxido de carbono.

Por lo que respecta a México, la mayoría de los modelos proyecta un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio; ello, aunque se espera un incremento de esta variable en otras regiones del mundo. Seager *et al.* (2007), han mostrado que el noroeste del país se encuentra en un proceso de alta aridización debido a una baja de la precipitación y a un alza de la evaporación reportando un incremento de las demandas hídricas de los cultivos por efecto del cambio climático (Rodríguez *et al.*, 2007). Allen *et al.* (1991), muestran que los requerimientos de riego se derivan del efecto de la disminución de la precipitación, del impacto del incremento de la temperatura en la ET_0 y del acortamiento del ciclo fenológico. Sin embargo, la mayoría de los estudios no consideran esta última variable. Allen *et al.* (1991), predijeron una reducción del ciclo fenológico del maíz en el rango de 0 a 80 días, y de 36 a 48 en el

del trigo, en las grandes planicies de los Estados Unidos. Para la alfalfa, Allen *et al.* (1991) reportaron una iniciación temprana del crecimiento y un retraso de su dormancia, lo cual resultará en un mayor número de cortes y en un mayor consumo de agua por año agrícola.

Pese a su importancia en el desarrollo del país, los sistemas productivos agrícolas siguen degradándose a una intensidad alarmante. Se ha documentado que la mayoría de los servicios de los agrosistemas no son sustentables, por lo que las políticas de erradicación de la pobreza en las zonas rurales no serán exitosas si dichos sistemas continúan siendo degradados. Aunque la pobreza puede ser un factor importante en el uso insostenible de los recursos, los factores decisivos en la degradación de los agrosistemas son el cambio en el uso del suelo, la variabilidad climática, las especies invasivas, la sobreexplotación y la contaminación de los recursos naturales, y los defectos en la gobernabilidad y en el mercado. A lo anterior se ha agregado un nuevo factor, el cambio climático, que presenta un reto para el sector agrícola, ya que sus impactos potenciales incluyen una intensificación del ciclo hidrológico, especialmente en las zonas costeras, las áridas y las semiáridas.

Cualquier cambio en los patrones climáticos actuales afectará el desarrollo y los procesos fisiológicos de los cultivos. Se ha afirmado que los impactos del cambio climático deben estudiarse localmente, dada la variabilidad espacial y temporal de sus proyecciones (Rosenzweig y Daniel, 1989; Goyal, 2004). Actualmente no existen estudios que cuantifiquen para México, y en particular para el estado de Sinaloa, los impactos del cambio climático en los procesos fisiológicos de los cultivos.

2.5. Caracterización de cultivos

2.5.1. Cultivo de frijol

El consumo de frijol no es tan importante como el trigo, el maíz o el arroz, más bien es un producto cuyo consumo se localiza en determinados países de América y África. Sin embargo, la importancia que tiene la población de origen latino en los Estados Unidos, ha hecho que en ese país se consuman crecientes volúmenes de esta leguminosa. Además, una parte de los volúmenes que allí se producen se destinan a cubrir el déficit de algunos países consumidores latinoamericanos.

La superficie cosechada, el rendimiento y la producción mundial de frijol manifiestan una variación positiva. La producción creció más (1.3% anual) que la superficie cosechada mundial (0.6%), por lo que se desprende que el crecimiento de la primera variable se debe más a incrementos en los rendimientos (0.73%) que a los registrados en la superficie. La producción mundial de frijol no tiene un peso sobresaliente en comparación con la de otros granos, debido a diversos factores, sobre todo de tipo cultural, que intervienen en su consumo. Sin embargo, en los últimos 10 años muestra una tendencia creciente de acuerdo con reportes de FAO.

México es el quinto productor de frijol en el mundo desde el año 2001, cuando superó a EUA, con una producción promedio en el periodo, de 1.2 millones de toneladas y una participación porcentual del 7 por ciento. Lo anterior, a pesar de ser el tercer país en importancia respecto de la superficie cosechada, lo que es ocasionado por los menores rendimientos en relación con otros países, ya que en este último rubro, se encuentra en el décimo lugar mundial.

Para el estado de Sinaloa, el cultivo de frijol es una de las principales alternativas durante el ciclo otoño invierno, los antecedentes de la producción indican que en los últimos 17 años el rendimiento medio por hectárea de frijol ha crecido a una tasa del tres por ciento anual, equivalente aproximado a 50 kg por año (Sifuentes *et. al.*, 2009).

El cultivo de frijol en el ciclo otoño-invierno en la zona norte del estado específicamente en el Valle del Fuerte, desde hace algún tiempo, se ha preferido para sembrarse por su ciclo de vida tan corto, de siembra hasta cosecha, esto a favor de permitir un segundo cultivo, aun cuando se tiene conocimiento sobre el manejo del cultivo, quedan interrogantes sobre la mejor forma de efectuar su nutrición y manejo del riego, con la finalidad de lograr una mejor rentabilidad de la que actualmente se posee.

En el estado, específicamente la zona de riego, se cultivan alrededor de 82,000 ha; que aportan una cosecha aproximada de 123,000 t con rendimiento promedio de 1.5 ton ha⁻¹ (SIAP 2013)

A pesar de las grandes extensiones que se establecen de este cultivo, se presenta el problema de no mantener una constante positiva en cuanto a rendimiento se refiriere, ya que la producción varía constantemente entre cada ciclo del cultivo. El cultivo de

frijol presenta una alta respuesta a la adición de los diferentes nutrientes esenciales y agua de riego, por lo que un buen suministro y manejo de los elementos correctos mejora la obtención de buenos resultados.

2.5.1.1. Impacto de la temperatura en el desarrollo del cultivo.

La planta de frijol para poder producir normalmente necesita estar bajo ciertas condiciones especiales. Para que puedan florecer, se necesitan de algunas condiciones específicas del medio ambiente donde se desarrollan. De las etapas del cultivo la iniciación floral es la más importante, debido a que es esta fase en la que se marca la transición de estado vegetativo al reproductivo.

Después de la inducción floral, la aparición de flores y la fructificación pueden ser acelerados, retardados o anulados dependiendo de las condiciones ambientales (Enríquez, 1977). Los dos factores que más frecuentemente han demostrado controlar los procesos florales iniciales, son la duración del día y la temperatura ambiental (Lang, 1952).

Enríquez (1977) menciona que la temperatura afecta a todo el cultivo dando como resultado muchos cambios en los procesos normales de las plantas. La temperatura puede afectar al cultivo acortando considerablemente su ciclo vegetativo, pero al mismo tiempo puede cambiar su estructura o hábito de crecimiento en plantas de hábito indeterminado, aunque el medio ambiente no lo modifica para las de hábito determinado.

La tendencia del agua a evaporarse se duplica cuando la temperatura aumenta de 10-11 °C, debido a este efecto, la temperatura en la hoja y del agua que contiene es uno de los factores más importantes que afectan la transpiración y la turgencia de este órgano. La temperatura en su superficie puede ser similar a la del medio ambiente, pero la temperatura a plena exposición puede ser de 5-10 °C mas alto que la temperatura del medio ambiente (Enríquez, 1977). El mismo autor menciona que el crecimiento de las raíces es principalmente afectado por la temperatura; en presencia de temperaturas bajas, las raíces no tienen mayor capacidad para asimilar carbohidratos y no crecen hasta que la temperatura no haya alcanzado niveles adecuados.

2.5.1.2. Requerimientos Agroclimáticos (clima y suelo)

La planta de frijol se desarrolla a altitudes que van de los 0- 2400 msnm. Requiere una precipitación media anual de 1,000-1,500mm, una humedad ambiental moderadamente (50-60 %). La temperatura óptima oscila los 18-25 °C, requiere una alta luminosidad. Se desarrolla en texturas franco-arcillosa y franco-arenosa. La profundidad radicular alcanza los 0.6-1 m. Tolera de 0-1 dS·m⁻¹ de salinidad, su pH varía de 5.3-7.5. Requiere buen drenaje para su desarrollo (Villalpando. 2001).

2.5.1.3. Requerimientos Hídricos

Es bien sabido que el frijol no tolera el exceso ni la escasez de agua, sin embargo, la planta ha desarrollado algunos mecanismos de tolerancia a estas condiciones de estrés, como el aumento en el crecimiento de las raíces para mejorar la capacidad de extracción de agua. En cambio, no se han identificado mecanismos de tolerancia al exceso de agua y su recuperación frente a este hecho se relaciona con la habilidad para producir raíces adventicias (Ríos, 2002).

Para esta planta una cantidad de agua ente 300 y 400 mm, incluidos riego y precipitación, son suficientes para obtener una buena producción en frijol. El mayor consumo de agua se presenta durante los periodos de floración y formación de grano (Ríos, 2003).

Estudios realizados para medir el consumo de agua del frijol a lo largo de las etapas de desarrollo han permitido determinar que el mayor consumo se da en las etapas de floración y formación de las vainas (Ríos, 2002).

2.5.1.4. Etapas Fenológicas del cultivo de frijol

Para el cultivo de frijol, dentro de su ciclo biológico existen dos etapas dentro de su ciclo, la vegetativa y la reproductiva. La primera inicia cuando las semillas tienen las condiciones necesarias para la germinación, y termina cuando aparecen los primeros botones florales. Durante la germinación y la emergencia hay absorción de agua y los tejidos llegan a tener la cantidad de agua necesaria para iniciar las actividades metabólicas (CIAT 1983).

En total se han identificado diez fases de desarrollo dentro del ciclo vegetativo; en la etapa vegetativa se distinguen cinco: germinación, emergencia, hojas primarias, primera hoja trifoliada y tercera hoja trifoliada, mientras que en la reproductiva son: prefloración, floración, formación de vainas, llenado de vainas y maduración (White, 1998).

La etapa V0 comienza en el día que la semilla tiene humedad suficiente para el comienzo del proceso de germinación, el día del primer riego o de la primera lluvia. La semilla absorbe agua inicialmente y ocurren en ella los fenómenos de división celular y las reacciones bioquímicas que liberan los nutrimentos de los cotiledones. Posteriormente emerge la radícula, la cual se convierte en raíz primaria al aparecer sobre ella las raíces secundarias y las raíces terciarias. El hipocotilo también crece quedando los cotiledones al nivel del suelo, terminando en este momento la etapa de germinación (CIAT, 1983).

Después de la germinación y emergencia (etapa de crecimiento V1) la planta alcanza a acumular peso seco principalmente en los tejidos vegetativos. La fase vegetativa dura hasta la aparición de los primeros botones florales, a los 10 o 15 días de crecimiento de la planta ya se pueden observar algunos botones microscópicos (White, 1998).

La etapa V1 inicia cuando los cotiledones de la planta aparece a nivel del suelo, se considera que un cultivo de frijol inicia la etapa V1 cuando el 50 % de las plantas emergidas presentan los cotiledones a nivel del suelo (CIAT 1983).

La etapa V2 comienza cuando las hojas primarias de la planta están desplegadas. Las hojas primarias del frijol son unifoliadas y opuestas, están situadas en el segundo nudo del tallo principal y cuando están completamente desplegadas se encuentran generalmente en posición horizontal, pero aun no han alcanzado su tamaño máximo. En esta etapa comienza el desarrollo vegetativo rápido de la planta, durante el cual se formará el tallo, las ramas y las hojas trifoliadas, las cuales son alternas y empiezan su crecimiento. En esta etapa los cotiledones pierden su forma, arqueándose y arrugándose. El crecimiento de una hoja trifoliada incluye tres pasos: inicialmente, los foliolos todavía unidos aumentan de tamaño, después éstos se separan y finalmente se despliegan y se extienden en un solo plano (CIAT 1983).

La etapa V3, inicia cuando la planta tiene la primera hoja trifoliada completamente abierta y plana. La hoja aun no ha alcanzado su tamaño máximo y son aun cortos tanto el entrenudo y el pecíolo de las hojas trifoliadas. En esta etapa la primera hoja trifoliada se encuentra por debajo de las hojas primarias. Cuando el pecíolo crece y la primera hoja trifoliada se sobrepone a las hojas primarias, la segunda hoja trifoliada ya ha aparecido y los cotiledones se han secado completamente y por lo general, han caído (CIAT 1983).

La etapa V4, comienza cuando la tercera hoja trifoliada se encuentra desplegada. En esta etapa se pueden diferenciar claramente algunas estructuras vegetativas como el tallo, las ramas y otras hojas trifoliadas. En esta etapa comienza la aparición del primer botón o racimo floral (CIAT 1983).

En la fase reproductiva ocurren las etapas de prefloración, floración, formación de vainas, llenado de las vainas y maduración. En plantas de crecimiento indeterminado, el crecimiento de estructuras vegetativas continúa durante esta fase; para las plantas de crecimiento determinado, cuando empieza la fase reproductiva se detiene el desarrollo de nuevas estructuras vegetativas (CIAT, 1983).

En la **Figura 4** se muestra un esquema representativo de las etapas y fases de desarrollo del cultivo de frijol.

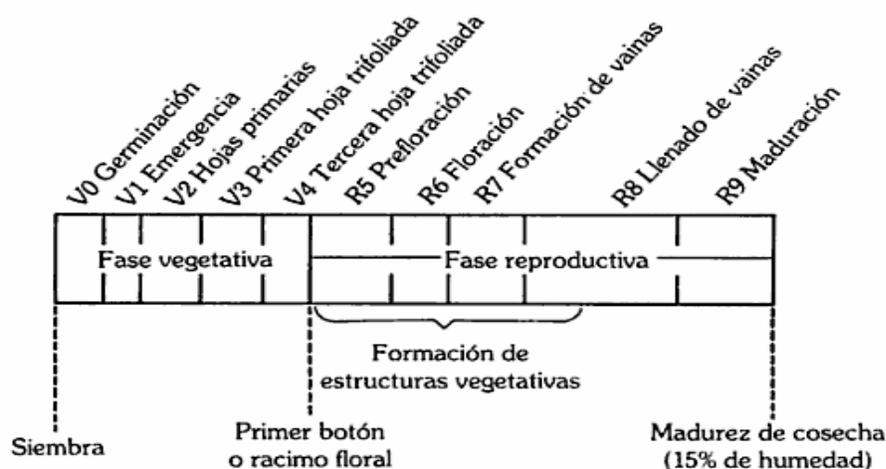


Figura 4. Escala de desarrollo de una planta de frijol (CIAT 1983).

White (1998) menciona, que la fase reproductiva está comprendida entre el momento de la aparición de los primeros botones florales (R_4) y la madurez de cosecha (R_9). Con el inicio de la floración (R_5), y pocos días después con la formación de las vainas, la planta empieza a utilizar mayor cantidad de sus recursos en la formación de las vainas y luego de las semillas. Este cambio en las propiedades de crecimiento empieza a frenar el crecimiento vegetativo, aunque la rapidez con que este ocurre varía mucho entre variedades de frijol con diferentes hábitos de crecimiento. En variedades de crecimiento determinado esta transición es muy rápida, mientras que en las de crecimiento indeterminado el cambio se presenta de una manera gradual debido a que los crecimientos vegetativo y reproductivo ocurren simultáneamente. Llega un momento en el cual la demanda de nitrógeno llega a ser tan grande que las hojas empiezan a morir, permitiendo que su contenido de nitrógeno sea conducido a las vainas; esto es lo que marca el comienzo de la maduración.

En la **Figura 5** se muestra el desarrollo fenológico del cultivo de frijol en base a la acumulación de °D, utilizando como temperaturas umbrales 8-23 °C, para Sinaloa.

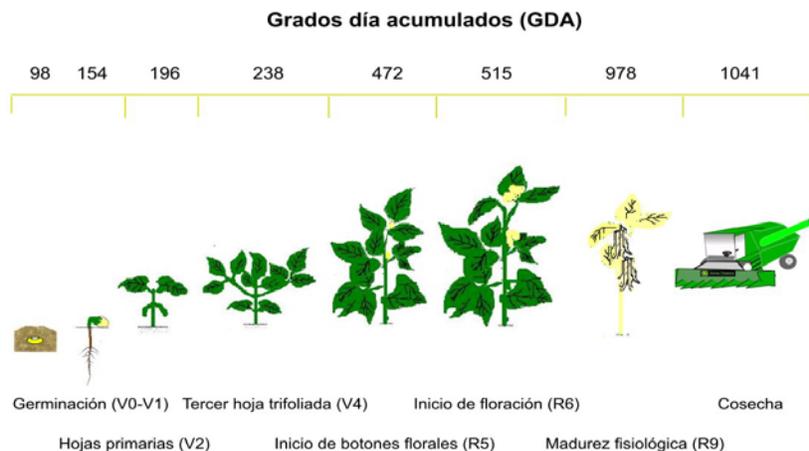


Figura 5 Fenología del frijol.

2.5.2. Cultivo de papa

El consumo de papa a nivel mundial representa uno de los más importantes entre las hortalizas, destacando algunas regiones como Europa, donde el consumo de este producto es toda una tradición (Barreiro *et al.*, 1998).

Según la última información de la FAO la producción de la papa a nivel mundial se mantiene alrededor de 296 millones de toneladas y cubre más de 18 millones de hectáreas. Con la desintegración de la Unión Soviética, actualmente China es el mayor productor de papa a nivel mundial.

La India ocupa el cuarto lugar a pesar de que la producción de papa en Europa ha disminuido desde los principios de los sesenta, esta disminución ha sido más que compensada con el crecimiento de Asia, África y América Latina, lo cual explica el aumento global en la producción de toneladas de papa (Alonso *et al.*, 2002).

En los últimos años el porcentaje de producción de papa a nivel mundial en los países en desarrollo aumentó de 31% a 41%. Así el progreso afirma la creciente importancia de la papa como fuente de alimento, trabajo e ingreso para Asia, África y América Latina (Barreiro *et al.*, 1998).

La papa (*Solanum tuberosum L.*) constituye el cuarto alimento de mayor consumo en el mundo y su producción, a nivel mundial, es de unos 320 millones de toneladas por año. Esta cantidad tiende a aumentar mientras que la de los otros tres alimentos más consumidos, maíz, trigo y arroz, va decreciendo (Barboa *et al.*, 2008).

Una de las hortalizas que en México se cultiva a lo largo de todo el año agrícola es la papa, producto que prácticamente se destina al consumo interno, ya que es poco lo que se exporta.

La importancia de la papa en nuestro país, radica en dos hechos:

Por su alto valor alimenticio, ya que los especialistas consideran que la papa contiene carbohidratos, proteínas, celulosa, minerales, así como vitaminas A, C, G y vitaminas del complejo B (Barreiro *et al.*, 1998).

De igual forma se considera que bajo las condiciones apropiadas, la papa tiene un contenido mayor de nutrimentos que los cereales. Así como también por la importancia económica que tiene dicha hortaliza; esta proporciona rentabilidad a sus productores y fuentes de empleo en las diferentes regiones productoras sobre todo durante el periodo de cosecha (Barreiro *et al.*, 1998).

El estado de Sinaloa es el principal productor de papa a nivel nacional llegando a establecerse 14,000 ha, anualmente (SIAP 2013) lo que equivale al 20 % de toda la superficie establecida a nivel nacional y mantiene un crecimiento importante, aún cuando es un cultivo de altos costos de producción; ya que esta solanácea requiere una alta frecuencia y demanda hídrica, representando una opción rentable, obteniendo producciones de entre 20 y 30 ton ha⁻¹.

La alta variabilidad climática y la cultura del uso excesivo de insumos como agua y fertilizantes, han ocasionado una tendencia hacia la baja rentabilidad. Además de lo anterior, no se produce semilla certificada suficiente en el estado que se adapte a las condiciones de la región, importando de otros países como Estados Unidos y Canadá generando la necesidad de estudiarlos en la zona de interés, aunque los productores aplican su criterio y experiencia dejando a un lado la parte científica (Sifuentes *et al.*, 2010).

Sinaloa se ha destacado como la principal identidad productora de papa en México, además de ser un proveedor importante de las industrias de fritura y un destacado productor de semilla para la siembra. El cultivo de esta hortaliza se ubica principalmente en las áreas de riegos de la zona norte del estado, en los distritos de los Mochis y Guasave. Las principales variedades que se generan en dicha región son Alpha, Atlantic y Fianna (Barreiro *et al.*, 1998).

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) es uno con los más altos costos de producción, lo cual hace necesario buscar nuevas alternativas y metodologías que optimicen su manejo cultural y agronómico para hacerlo más rentable.

En su ciclo normal, la papa se siembra durante los meses de octubre a diciembre y se cosecha a finales de enero y hasta principios de mayo.

2.5.2.1. Impacto de la temperatura en el desarrollo del cultivo de papa

Los efectos de temperatura y fotoperiodo son cruciales al inicio del crecimiento del tubérculo y la subsecuente partición de la materia seca; es así como el fotoperiodo largo retrasa el comienzo del crecimiento y llenado del tubérculo, las tasas de crecimiento absoluta y relativa se reducen solamente con días largos, así como la tasa

relativa de participación de asimilados a nivel del tubérculo. Las condiciones más favorables, para la tuberización y crecimiento del tubérculo son días cortos y temperaturas nocturnas bajas. (Van Dam *et al.*, 1996).

Los requerimientos térmicos para el crecimiento del cultivo de la papa son: Temperatura mínima de 7 °C, máxima de 28 °C, siendo la temperatura óptima de 15-20 °C para que la planta realice la fotosíntesis adecuadamente.

Para temperaturas menores a 6 °C se detiene el crecimiento y a menores de 4 °C hay muerte de la parte aérea. El desarrollo óptimo del tubérculo se da entre los 14 y 18 °C; existe una tendencia de termo-periodismo diario, requiere de temperaturas nocturnas de 16 °C y diurnas de 24 °C (oscilación de 8 °C).

Las temperaturas altas también causan incrementos significativos en la distribución de asimilados en las hojas, originando reducción en el suministro de carbohidratos, debido a que se limita la entrada de asimilados e inhibe directamente la conversión de azúcares a almidón. La comparación de régimen de temperaturas 30/12 °C (día/noche) y 17/10 °C bajo condiciones de días cortos, la proporción de peso vegetativo es 12 veces mayor con temperaturas altas, pero la producción de tubérculos es 19 veces más alta con temperaturas bajas. El tubérculo es el órgano más sensible al fotoperiodo y al régimen de temperaturas; por ejemplo con 32/22 °C (día/noche) y 16 horas de régimen de fotoperiodo se inhibe completamente la formación de tubérculos en materiales de la subespecie *tuberosum*; la acumulación de materia seca y la participación de asimilados en plantas de papa son afectadas por las variables ambientales de fotoperiodo y temperatura (Lafta and Lorenze, 1995; Van Dam *et al.*, 1996)

El periodo de emergencia hasta el inicio de tuberización requiere temperaturas de 2 hasta los 20 °C. Bajo temperaturas altas (20-29 °C), las plantas producen más follaje, se induce el crecimiento de tallos, pero las hojas son más pequeñas debido a la expansión del área foliar, los niveles de almidón se reducen en las hojas, especialmente el acumulado en las hojas maduras.

2.5.2.2. Requerimientos Agroclimáticos (clima y suelo)

El cultivo se desarrolla a una altitud 0-3000 msnm, precipitación; 500-700 mm, humedad ambiental de (50-60 %), temperatura de 19.2 °C, luminosidad alta, textura franco-arcillo-limosos. profundidad mayor a 60 cm, salinidad: 0-9-1.6 dS m. pH: 4.8-5.6, y buen drenaje (Villalpando. 2001) (Sifuentes *et al.*, 2010).

2.5.2.3. Requerimientos Hídricos

Ekanayake (1994), señala que en términos generales el cultivo de papas debe regarse a 0.35 bares de potencial tensiométrico del suelo para mantener un micro medio bien irrigado. Al respecto Soboh *et al.* (2000), afirman que la tensión de humedad ideal para el cultivo es de 0.4 bares. Según Jeréz y Simpfendöfer (2000), las necesidades de agua de la papa varían entre 400 y 600 mm por temporada. Mientras que Haverkort, (1986) menciona que un buen cultivo de papa requiere en promedio de 400 a 800 milímetros de agua dependiendo de las condiciones climáticas y de la duración del período vegetativo. Al respecto Bosnjak y Pejic (1996), reportan necesidades que varían entre 460 y 480 milímetros, en tanto que Klassen *et al.* (2001), señalan que para la obtención de buenos rendimientos y dependiendo de las condiciones climáticas de la zona, el cultivo de papas necesita de aproximadamente 455 milímetros de agua por temporada.

Lo anterior concuerda con lo señalado por Doorembos y Kassam (1979), quienes señalan que para lograr altos rendimientos en variedades cuyos ciclos sean de 120 a 150 días, los requerimientos hídricos son de 500 a 700mm por temporada, dependiendo del tipo de clima.

Las necesidades de agua para el cultivo de papa varían durante el ciclo vegetativo, son importantes sobre todo en el momento de la iniciación de los tubérculos y la manifestación de un estrés hídrico en ese estudio puede acarrear una reducción en el número de esbozos formados por planta, consecutivo a una reducción del número de estolones formados por tallo (Haverkort *et al.*, 1990).

Un exceso de agua limita el desarrollo de las raíces y retrasa la madurez; según el momento en que esta situación puede causar la podredumbre de las plantas o de los tubérculos hijos (Alonso *et al.*, 2002).

La papa es una planta que no tolera exceso ni escasez de agua, el mayor consumo de agua se presenta durante los periodos de floración y formación de tubérculos, según sea el sistema de riego utilizado en el cultivo será el número de riegos a aplicar, para un sistema de riego por superficie un total de 6 riegos más el de germinación son suficientes a lo largo del ciclo de cultivo teniendo un intervalo de entre 10 y 12 días entre cada uno de estos.

2.5.2.4. Etapas Fenológicas

Tres fases se distinguen durante el periodo de crecimiento y desarrollo de la planta de papa: la primera, se inicia con la brotación de los tubérculos durante el almacenamiento, continua con la siembra del tubérculo (semilla) y la emergencia de los brotes a nivel de superficie del suelo avanzando hasta la expansión de las primeras hojas de los tallos principales, que son los que nacen directamente de los tubérculos madre. La segunda, se inicia con el crecimiento de las ramificaciones, de los tallos aéreos y de los órganos subterráneos (desarrollo del tubérculo) y termina cuando la planta alcanza su mayor área foliar; una producción bastante alta de metabolitos pasa a las ramificaciones axilares que disminuyen y se interrumpen casi por completo a medida que se incrementa la traslocación de estos a los tubérculos (maduración) (Lujan, 1994).

Para Rowe (1993), el crecimiento y desarrollo de la planta de papa se pueden diferenciar cinco estados:

- **Crecimiento uno (crecimiento de los brotes):** desarrollo de los brotes de los ojos del tubérculo-semilla, que emergen sobre la superficie del suelo, y comienza el desarrollo de raíces en la base de los brotes emergidos; las reservas de la semilla-tubérculo son la fuente de energía para el crecimiento para este estado, ya que la fotosíntesis no comienza.

- **Crecimiento dos (crecimiento vegetativo):** estado en el que las hojas, ramas y tallos se desarrollan sobre la superficie del suelo y los nudos del brote se alargan, y aumentan las raíces y estolones, los cuales se extienden por debajo de la superficie del suelo; la planta obtiene algo de energía del tubérculo-semilla en la parte temprana de este estado de crecimiento, pero en este periodo comienza la fotosíntesis y los procesos de producción de carbohidratos (fijación de carbono), como fuente de energía para futuro crecimiento y desarrollo; en este estado se forman todas las partes vegetativas de la planta y comienza la emergencia y crecimiento de las puntas de los estolones por debajo de la superficie del suelo, hasta cuando se inicia el desarrollo de los tubérculos.
- **Crecimiento tres (iniciación de tubérculos):** en este estado de crecimiento se forman los tubérculos a partir de la punta del estolón; la iniciación de tubérculos es controlada por reguladores hormonales de crecimiento, producidos por la planta; este estado tiene un periodo de duración de 10-14 días y en muchas variedades el final de este periodo generalmente coincide con una floración temprana, donde pocas flores se abren y son poco visibles. Las variedades precoces o de maduración temprana usualmente inician su tuberización más temprano que las variedades tardía; los materiales de ciclo largo continúan la iniciación del tubérculo durante el estado de crecimiento cuatro. El manejo de agua durante este estado de crecimiento tres es especialmente importante para ayudar el desarrollo del cultivo. De un 80-90 % de disponibilidad de agua en el suelo durante el comienzo de crecimiento del tubérculo y ensanchamiento del mismo, favorece en crecimiento rápido de la planta.
- **Crecimiento cuatro (llenado del tubérculo):** las células del tubérculo se expanden con la acumulación de agua, nutrientes y carbohidratos. Durante esta fase de crecimiento, los tubérculos son órganos dominantes de depósito y movilización de nutrientes orgánicos dentro de la planta.
- **Crecimiento cinco (maduración):** el follaje entra rápidamente en proceso de senescencia, éste cambia a color amarillo y las hojas se pierden, la fotosíntesis decrece gradualmente, la tasa de crecimiento del tubérculo se hace más lenta y el follaje eventualmente muere. El contenido de materia seca de los tubérculos alcanza el

máximo valor en este estado y la piel del tubérculo se endurece, aumentando su espesor.

Wiersema (1985) menciona que después de su iniciación, el tubérculo de papa se desarrolla de manera continua, tanto morfológica como fisiológicamente, en todo momento el tubérculo tiene dos edades diferentes: una edad cronológica y una fisiológica.

La edad cronológica se refiere a la edad del tubérculo desde el momento de la iniciación del tubérculo o desde su cosecha, la cual se expresa en días, semanas o meses sí referencia a las condiciones ambientales; la edad fisiológicamente se refiere principalmente al proceso de desarrollo de los brotes, esto depende tanto de la edad cronológica del tubérculo como de las condiciones ambientales. Los tubérculos pueden tener la misma edad cronológica, pero sus condiciones fisiológicas pueden ser diferentes o viceversa.

En la **Figura 6** se describen las principales etapas de desarrollo del cultivo de la papa, expresadas a su vez a °D.

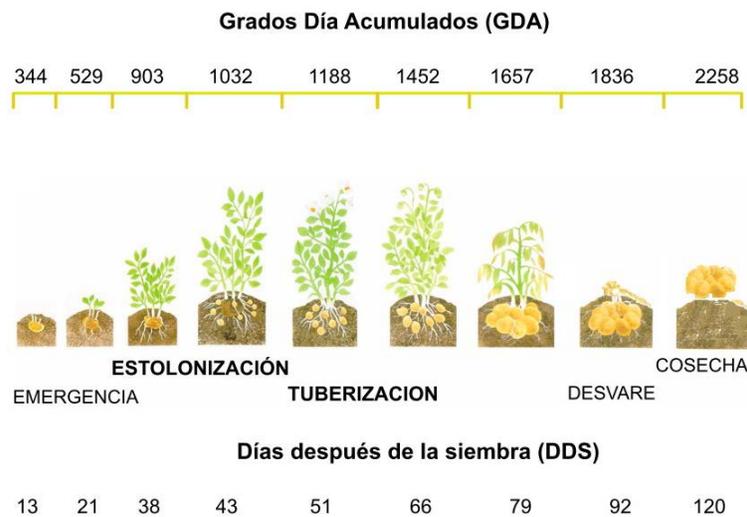


Figura 6. Desarrollo fenológico del cultivo de la papa.

2.6. Modelos de simulación biológica

En forma general se puede definir a un modelos de simulación como un programa que permite describir mediante fórmulas matemáticas diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico, y que permite representar conceptualmente una simplificación del sistema de producción.

En el área de Ingeniería de Sistemas se refiere al concepto de modelación matemática, como la construcción de los mismos enfocados a una parte de la realidad y el estudio de sus propiedades es realmente lo que la ciencia trata (Ljung y Glad, 1994).

De Wit propuso, en los años 60s, la utilización del análisis de sistemas y la simulación al estudio de sistemas biológicos en general y al crecimiento y desarrollo de cultivos en particular, contribuyendo a la definición de conceptos básicos como sistema, modelo matemático y simulación (de Wit, 1982, Rabbinge y de Wit, 1989). De Wit define *un sistema como una parte limitada de la realidad que contiene elementos interrelacionados* (de Wit, 1993) en nuestro caso un sistema agrícola (cultivo), por lo que el conjunto de todas las relaciones de los componentes se le denomina estructura del sistema.

Jones y Luyten (1998) definen un sistema como la interacción de componentes y sus interrelaciones agrupados conjuntamente con el propósito de estudiar alguna parte de la realidad. A la representación simplificada de un sistema se le denomina modelo. Para De Wit los modelos matemáticos constituyen la simulación y *el estudio de su comportamiento en relación a aquellos de los sistemas* (De Wit, 1993). Para Thornley & Johnson (2000), los modelos matemáticos pueden contribuir a ampliar el conocimiento y ayudar en aplicaciones prácticas.

Desde la década del 70 (últimas cuatro décadas) la comunidad científica ha desarrollado modelos matemáticos de crecimiento para simular el desarrollo (fenología) y crecimiento de los cultivos, siendo estas, una herramientas fundamentales para la investigación ya que simulan la mayoría de los procesos fisiológicos. El uso de modelos o construcciones analógicas es práctica general en la ciencia y fundamento de la

simulación con computadora (Von Bertalanffy, 1968), ya que además permiten considerar al cultivo como un sistema que interactúa con el medio a través de sus límites.

Las más prestigiadas revistas científicas de fisiología vegetal y agronomía publican cada año nuevos modelos matemáticos y análisis de los mismos. En países como Holanda, a través de instituciones de enseñanza como La escuela de graduados en Teoría de Ecología de la Producción (Theoretical Production Ecology) de la Universidad de Wageningen, utilizan el enfoque de las variables de estado para desarrollar modelos dinámicos de cultivos en campo abierto.

Sin embargo, la comunidad científica de México y de otros países subdesarrollados están poco familiarizados con los modelos matemáticos de los sistemas agrícolas prevaleciendo prejuicios que limitan no solo el uso de los modelos matemáticos generados en los países desarrollados, sino la generación de modelos propios y su empleo en la actividad académica y práctica cotidiana.

Estos modelos requieren gran cantidad de datos de entrada para su funcionamiento. Estos datos son de diferente clase: meteorológicos, características del suelo, propiedades del cultivo y manejo del mismo como también de agua, nutrientes, etc. Como contraparte, brindan gran cantidad de resultados para el análisis y permiten además predecir los requerimientos que serán necesarios para lograr un rendimiento óptimo. Otra ventaja es la de poder realizar simulaciones de diferentes escenarios de manejo propuesto, como fechas de siembra, densidad, profundidad, cantidad agua de riego, dosis de fertilizantes, etc., con el fin de evaluar a priori las diferentes alternativas de gestión de insumos y programación.

Pueden mencionarse algunos de los objetivos y aplicaciones que tienen este tipo de modelos tanto en investigación como así también para el análisis de diferentes alternativas de manejo y diagnóstico a campo o en la utilización racional y optimización de los recursos e insumos que necesita el cultivo:

- Conocer y entender los procesos fisiológicos.

- Analizar datos experimentales para estudiar el comportamiento de diferentes cultivares en una zona.
- Conocer los rendimientos potenciales de un cultivar.
- Extrapolar resultados de una región a otra o de un año a otro.
- Optimizar los recursos para un manejo eficiente del cultivo.
- Zonificación agroecológica del cultivar.
- Estudiar los efectos de cambio climático.

2.6.1. Clasificación de modelos

Existen modelos de diferente complejidad, tanto por la cantidad y calidad de los datos de entrada necesarios para que funcionen, como por los parámetros que pueden simular.

Los modelos simulan el momento de ocurrencia de los estados fenológicos, la evolución de la producción de materia seca por cada fracción de la planta y el rendimiento en función de variables de suelo, clima, manejo y del híbrido o la variedad empleada. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo.

Los modelos más complejos permiten realizar análisis de sensibilidad del rendimiento a distintos factores, combinando diferentes suelos, climas, cultivares y manejo. La mayoría de las aplicaciones de los modelos están relacionadas a aspectos de manejo, como estrategias de fertilización o riego, fechas de siembra o cultivares de diferente ciclo, que deben ser evaluados en una serie climática histórica.

Para comprender la filosofía de concepción de los modelos de simulación de crecimiento de cultivos, es necesario precisar algunos conceptos y definiciones de uso corriente en este tema: Sistema: Parte limitada del universo objeto de estudio.

Límites: Contorno ideal de un sistema por el que puede atravesar energía o materia.

Modelo: Representación simplificada de un sistema.

Simulación: Representación en el espacio y/o tiempo del funcionamiento de un modelo para el estudio del comportamiento del mismo en relación al sistema real.

Para el caso de cultivos, el sistema es una porción de la litósfera que intercambia con el medio exterior energía, nutrientes, agua, etc.

Existe una cantidad muy importante y variada de modelos para pronóstico de cosechas. Ellos han sido concebidos para diferentes propósitos. Algunos de ellos abordan uno o dos aspectos que, a criterio del analista, representan los factores limitantes en los rendimientos. Es por ello que para estos modelos no es necesario simular todos los procesos fisiológicos del crecimiento de la planta sino que se relacionan los factores más relevantes a través de índices que luego correlacionan con los rendimientos.

Otros, en cambio, permiten obtener una descripción de todos los procesos fisiológicos para cada parte de la planta “haciéndola crecer” en función de los algoritmos que simulan estos procesos. Estos modelos permiten obtener directamente los componentes de rendimiento.

Los modelos pueden ser usados para probar hipótesis y pueden ser aplicados en condiciones diferentes. También son útiles para formular nuevas hipótesis que requieren pruebas experimentales. Asimismo los modelos de crecimiento son herramientas útiles en enseñanza.

En general, se reconocen los enfoques teórico “Modelos Descriptivos” y empírico “Modelos Explicativos” como fundamentales para generar modelos de simulación de crecimiento de cultivos (Thornley y Johnson, 2000).

2.6.1.1. Descriptivos o Empíricos: Los modelos descriptivos muestran la existencia de relaciones entre los componentes del sistema, detallan las relaciones entre los factores y las respuestas del cultivo sin explicar las mismas (fotosíntesis de la hoja como función de la radiación solar, Índice de satisfacción de las necesidades hídricas como función del rendimiento). Los modelos empíricos más conocidos son los modelos de regresión simple y múltiple o modelos no lineales conocidos como ajuste de curvas, estos modelos necesitan calibración previa y los resultados deben ser correlacionados con la respuesta del cultivo que se desea obtener (por ejemplo Índice con rendimiento).

Esta correlación no es universal y debe realizarse cada vez que se desee aplicar el modelo en otros lugares.

2.6.1.2. Explicativos, teóricos o mecanistas: expresan las relaciones entre los factores y las respuestas del cultivo a través de modelos físico-matemáticos que se sustentan en hipótesis científicamente comprobadas (por ejemplo modelo de asimilación de CO₂ en una la hoja), ya que simulan una característica (i.e. crecimiento) en términos de procesos fisiológicos.

Llamados también teóricos o mecanistas normalmente están formados por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias definidos para describir el comportamiento de las variables de estado del sistema, las variables que representan las propiedades o atributos del sistema considerado. Los modelos mecanistas son más apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionan así una descripción cuantitativa y una explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema de cultivo (Thornley y Johnson, 2000).

Estos modelos necesitan calibración previa pero brindan directamente los resultados de las componentes de rendimiento. Una vez calibrado para el cultivar de interés, puede aplicarse en otros lugares sin necesidad de re-calibración ya que el modelo permite considerar los diferentes factores que pueden variar con el lugar (como clima, suelo, etc.) en forma directa. Éstos se conocen como *Modelos de Simulación de crecimiento*.

Hasta la actualidad se han desarrollado varios modelos para cultivos en campo abierto con diferentes objetivos, tanto científicos como prácticos. Pero en general, los modelos de crecimiento han sido desarrollados para formular y probar hipótesis sobre conceptos fisiológicos y agronómicos de los cultivos, para ayudar la enseñanza y para apoyar la toma de decisiones sobre el manejo del sistema agrícola (Van Ittersum *et al.*, 2003).

Diversos han sido los esfuerzos para modelar el crecimiento de cultivos, como resultado de ellos se han generado modelos o familias de modelos para diversos cultivos entre los cuales están CERES (Ritchie y Otter, 1985; Jones y Kiniry, 1986), EPIC (Williams *et al.*, 1989; SUCROS (van Keulen *et al.*, 1982; Spitters *et al.*, 1989).

Se han propuesto modelos de cultivos donde el crecimiento tiene las limitantes de disponibilidad de agua y nutrientes. En menor medida han sido desarrollados modelos para predecir el crecimiento real de un cultivo en los cuales las limitantes son además de agua y nutrientes, también las prácticas de manejo, plagas y enfermedades e incluso efectos negativos de contaminantes. Uno de los modelos teóricos más conocido es SUCROS (a Simple and Universal Crop Growth Simulator), el cual es un modelo de crecimiento y desarrollo potencial para cultivos en campo abierto desarrollado durante los últimos 20 años (van Keulen *et al.*, 1982; Spitters, *et al.*, 1989, Goudriaan y van Laar, 1994, van Laar *et al.*, 1997). SUCROS ha sido usado para estudiar el crecimiento potencial de cultivos tales como trigo, papa, remolacha, maíz, caña de azúcar y girasol. También ha sido la base para el desarrollo de modelos de crecimiento limitado por nutrientes y agua, así como para representar el crecimiento real de diversas especies anuales (arroz, trigo, soya, caña de azúcar, papa) y algunas especies perennes (pastos, pinos, manzana, cacao) (van Ittersum *et al.* 2003).

Otro modelo muy utilizado es el DSSAT (Sistema de Soporte de Decisiones para Transferencia Agro-tecnológica), que permite estimar los efectos de las diferentes prácticas de manejo y las condiciones ambientales sobre los cultivos (Jones *et al.*, 2003). La nueva versión del DSSAT contiene modelos para 17 cultivos, entre ellos el maíz, derivados de los modelos DSSAT-CROPGRO y CERES.

Doorenbos y Kassam (1986) desarrollaron uno de los métodos más utilizados para determinar el rendimiento usando parámetros empíricos obtenidos de experimentos en campo bajo diferentes niveles de estrés hídrico de los cultivos. Basados en que los modelos de simulación de cultivos son otra alternativa para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo porque se conocen las características genéticas y variables climáticas (Monteith, 1996). Además, se deben considerar diferentes factores y variables climáticas (condiciones ambientales, ciclo hidrológico, variaciones en el déficit hídrico, ciclo fenológico del cultivo, rendimientos, etc.) que predominan en la región de interés para el cálculo de los requerimientos de riego del cultivo (González-Camacho *et al.*, 2006).

La mayoría de los modelos (CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004) y PASSIM (Keating *et al.*, 2003 Heng *et al.*, 2009), tienen la desventaja de requerir un gran número de parámetros que demandan habilidades avanzadas para su calibración y operación, algunos son específicos por variedad o híbrido, lo que finalmente complica su adopción por los agricultores, de igual forma ocurre lo mismo con los descritos anteriormente.

2.6.2. Modelo de simulación biológica AquaCrop

En este aspecto, el modelo AquaCrop (Raes *et al.*, 2009) usa un número reducido de parámetros que se pueden aplicar a cualquier región del mundo ajustando solamente el clima, la densidad de población, el tipo de suelo, el requerimiento hídrico, el contenido inicial de agua y la fertilización para la región de interés. El modelo AquaCrop es relativamente nuevo (Raes *et al.*, 2009), de fácil manejo y en la agricultura de México no se ha utilizado con fines de planificación y de simulación de cultivos. Puede utilizarse como herramienta para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos y localidades (Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009).

Hasta la fecha, Aquacrop se ha utilizado para la simulación de algunos de los principales cultivos del mundo como el maíz o la cebada (Hsiao *et al.*, 2009). Sin embargo, son pocos los trabajos de simulación de frijol y papa con este modelo (Domínguez *et al.*, 2011; García-Vila y Fereres, 2012). Estos cultivos son sensible a la sequía, donde el nivel de déficit hídrico, junto al sistema de riego utilizado, juegan un papel fundamental de cara a los rendimientos alcanzables y la calidad de cosecha. Es por ello por lo que el uso de Aqua crop, con el fin de determinar la estrategia de riego más adecuada para los cultivos está plenamente justificada.

A continuación se muestra la operación y lógica utilizada por el modelo Aqua Crop **(Figura 7)**.

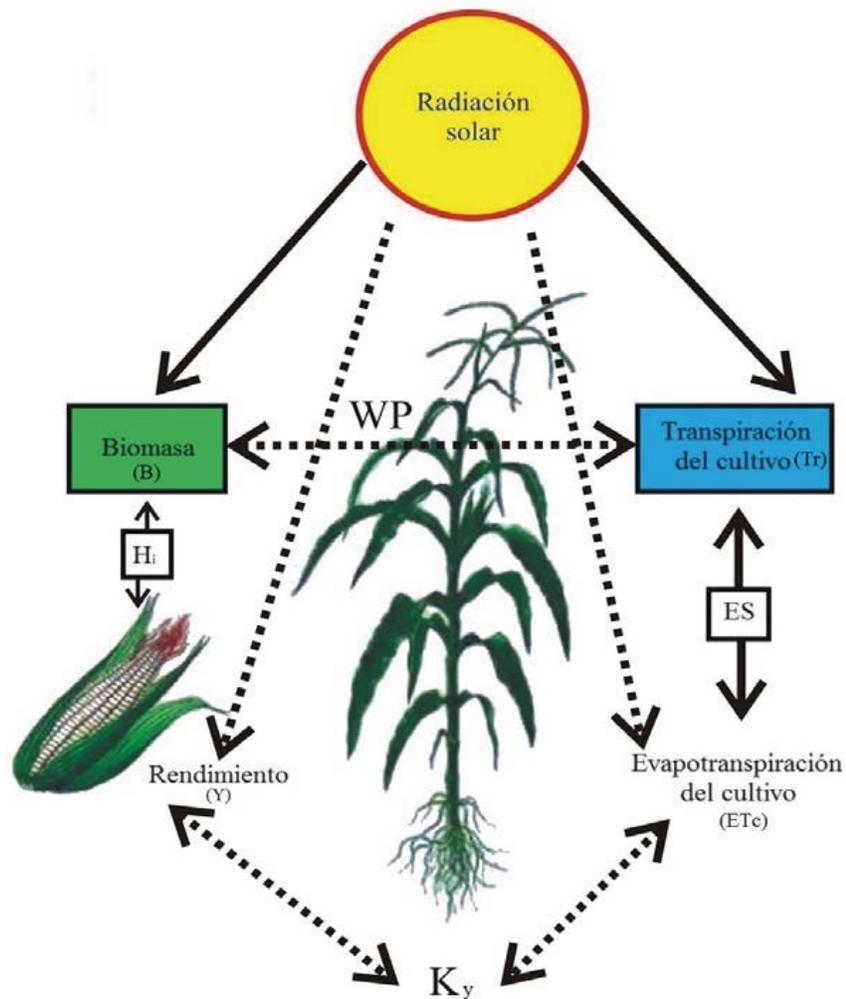


Figura 7. Operación y lógica en la simulación utilizada por el modelo AquaCrop en donde se involucran dos procesos: separación de la evaporación del suelo (ES) y la transpiración (Tr), y el rendimiento (Y) de la biomasa (B) e índice de cosecha (Hi). En donde WP es la productividad del agua y K_y es un factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptada de Raes *et al.*, 2009).

A continuación se mencionan algunas características del modelo de simulación biológica AquaCrop

Bondades

- Permite evaluar la influencia combinada de la elevación de CO₂ y temperatura en forma realística secano riego
- Determina el déficit de agua, permitiendo la programación de riego suplementario.
- Permite la evaluación del impacto del calendario de riego de lamina fija o de intervalos fijos y bajo diferentes métodos de riego.
- Lleva acabo análisis de escenarios climáticos futuros.
- Permite analizar estrategias de adaptación bajo condiciones de CC, como son manejo de variedades y/o épocas de siembra.

Limitaciones

- Su evaluación es puntual, no permitiendo análisis geográficos.
- No incluye muchos tipos de cultivos.
- No incluye módulos de plagas y enfermedades ni de salinidad de suelos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización y caracterización general de la zona de estudio

El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola OI 2012-2013 en el Campo Experimental del Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP, ubicado en el norte de Sinaloa (**Figura 8**) localizados en los 25° 45'49" Latitud Norte y 108° 51'41" del Longitud Oeste con una altura de 32 msnm, se encuentra localizado en la parte central del distrito de riego 075 Río Fuerte colindando con los distritos de 063 Guasave y 076 Valle del Carrizo



Figura 8. Ubicación del Campo Experimental del Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP, ubicado en el norte de Sinaloa.

Para fines de calibración, se utilizó la información obtenida por Sifuentes *et al.* (2010) en cultivo de frijol y papa de la evaluación realizada durante el ciclo otoño-invierno 2009/10,), ambas realizadas en terrenos del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF, en la ciudad de Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, a la altura del km 1609 de la carretera internacional México-Nogales, en un suelo de textura arcillosa.

En ambos experimentos se dio seguimiento fenológico y medición de las láminas de riego con la finalidad de obtener los datos de campo y alimentar el programa AquaCrop. Para el cultivo de papa la fecha de siembra fue el 11 de noviembre acumulando 2237 °D con unas temperaturas umbrales de 2-29 °C a madurez en 130 días después de la siembra, una densidad de población de 43,500 plantas ha-1 y un rendimiento de 35 ton ha-1 de cosecha en fresco. Para el cultivo de frijol la fecha de siembra fue el 15 de noviembre acumulando 1235 °D con unas temperaturas umbrales de 8-23 °C a madurez en 128 días después de la siembra, una densidad de población de 173,500 plantas ha-1 y un rendimiento de 3.32 ton ha-1.

3.1.1. Clima

La precipitación en el Valle del Fuerte se concentra durante cuatro meses, de julio a octubre, principalmente por la presencia de ciclones y varía alrededor de 170- 410mm anuales, la evapotranspiración de referencia (ET_o) excede a la precipitación durante todo el año fluctuando en valores que van de 1550-1750mm, por lo que indica que se requiere de riego para asegurar rendimientos comerciales.

3.1.2. Orografía y Suelo

La topografía predominante del Valle del Fuerte es regular, con suelos de tipo barrial (arcillosos), de buena calidad agrícola, donde se siembran generalmente granos y hortalizas.

3.2. Diseño experimental

Para el cultivo de frijol, se estableció una parcela experimental con dimensión de surcos partiendo de oeste a este de 114m de longitud, de norte a sur se encuentran surcos con espaciamiento de 80cm a la marca, tomando 10 camas (20 líneas de siembra) que hacen 1,824m². Para el caso del cultivo de papa, se estableció parcela de ocho surcos de 60 m de longitud separados a 80 cm a una profundidad de 15 cm de siembra.

3.3. Requerimientos del modelo AquaCrop

Según el modelo AquaCrop, los datos requeridos son (**Cuadro 3**); clima, la densidad de población, las características genéticas, el tipo de suelo, el nivel de fertilización, la evaporación del suelo, la evapotranspiración y el manejo del déficit hídrico, esto con la finalidad de simular el crecimiento y el rendimiento del cultivo.

Cuadro 3. Información requerida por el modelo AquaCrop

| Tipo de información | Variables | Periodo de los datos |
|---------------------------|--|---------------------------|
| Información meteorológica | Temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), precipitación (Pp), evapotranspiración de referencia (ETo) y además, considera una concentración media anual de CO2 en la atmósfera de 369.47 ppm para el año 2000 | Diario, decenal o mensual |

Los parámetros de conductancia estomatal, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha serán necesarios para la producción de biomasa y de grano. A continuación se presenta el **Cuadro 4** en el cual se muestran las ecuaciones necesarias para el cálculo de biomasa y producción de grano.

Cuadro 4. Ecuaciones requeridas por el modelo AquaCrop para el cálculo de biomasa y producción de grano.

| VARIABLE | ECUACION | DESCRIPCION |
|------------------------------|---|---|
| Rendimiento del cultivo | $Y = B * H_i$ | <i>B</i> es la biomasa del cultivo y <i>Hi</i> índice de cosecha dependiendo del tipo y variedad del cultivo. |
| Crecimiento de dosel vegetal | $CC = CC_0 e^{rCCt}$ Para la condición $CC \leq CCx/2$ | <i>CC</i> es la cobertura del dosel vegetal a tiempo <i>t</i> |

| | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|---|--|
| | | $CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC}$ | transcurrido (expresado en días o °D), CCo cobertura inicial del dosel ($t=0$), CCx máxima cobertura del dosel vegetal, CGC coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo para el cultivo considerado. |
| | Para la condición $CC > CCx/2$ | | |
| Indice de area foliar | | $CC = 1.005 [1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2}$ | Ajuste del crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población (plantas ha-1). Estimación a partir de datos de índice de área foliar (IAF). |
| Grados día (°D) | | ${}^{\circ}D = T_a - T_{c-\min}, T_a > T_{c-\min}$ ${}^{\circ}D = 0, T_a \leq T_{c-\min}$ | T_a = Temperatura promedio, T_c = Temperatura máxima, T_{\min} = Temperatura minima |
| Temperatura promedio (método 3) | T_a | $T_a = \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-\max}$ $T_a = \frac{T_{c-\max} + T_n}{2}, T_x \geq T_{c-\max}$ $T_a = \frac{T_{c-\min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-\min}$ | $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$ temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual la planta se desarrolla. T_x y T_n temperaturas máxima y mínima del día registradas. |

La estimación del estrés térmico será obtenida a partir de las condiciones de clima tomando en cuenta la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. El modelo considera tres tipos de estrés hídrico: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal, y 3)

cierre estomacal. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta el modelo considera una curva que se activa cuando se alcanzan límites establecidos para la humedad del suelo. El **Anexo D y E** muestra a detalle los parámetros conservativos del modelo AquaCrop para los cultivos de interés.

Según Heng *et al.* (2009) el modelo AquaCrop es robusto para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo del cultivo, por lo que es útil para planear y evaluar estrategias bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra.

Para demostrar las posibilidades de aplicación del modelos, es necesario realizar ensayos de los cultivos, con los híbridos y variedades más difundidos, en diferentes fechas de siembra, con diferentes contenidos de agua útil (con y sin aporte de riego), durante varias campañas. La información obtenida alimentara el modelo, y para una serie climática determinada se puede realizar el análisis de sensibilidad.

3.3.1. Comparación de métodos para la predicción de fenología

Existe una diversidad de modelos para estimar el tiempo térmico (Wang, 1960). El método estándar basado en la temperatura diaria promedio es el método más utilizado (Dufault, 1997) para estimar el tiempo térmico a través de °D. Sin embargo se han reportado en la literatura otros métodos específicos para cultivos para expresar el tiempo térmico como el método P-Días enfocado al cultivo de papa (Sands *et al.*, 1979). Otros métodos para estimar la fenología basado en °D han sido reportados por Villordon *et. al.*, (2009). La aplicación de cualquier método de predicción fenológica requiere de su calibración local. El objetivo de esta comparación de métodos es con fines de predicción de la fenología de cultivos para las condiciones del Valle del Fuerte Sinaloa. El mejor método seleccionado permitirá acoplar la aplicación de insumos de acuerdo a cambios en la fenología de los cultivos.

Se monitorearon 20 parcelas comerciales de papa (Cuadro 1), cinco con la variedad Atlantic y quince con la variedad Alpha, durante el ciclo Otoño-Invierno (OI) en dos años agrícolas (2005-06 y 2006-07).

Se monitoreó el desarrollo fenológico de cada parcela (**Cuadro 5**), registrando las fechas de aparición de las distintas etapas fenológicas hasta llegar a madurez fisiológica. Como referencia, se registraron los Días Cronológicos o Calendario (DC) acumulados requeridos para la ocurrencia de cada uno de las etapas fenológicas. En relación al método de riego, 18 parcelas fueron regadas por gravedad (surcos) y sólo dos por avance frontal (aspersión) en las parcelas del zapotillo y las olivas.

En todas las parcelas se aplicó el manejo agronómico convencional de la zona descrito por Sifuentes *et al*, (2009) con una densidad de población típica de la zona de 39,000 plantas ha⁻¹ con una distancia entre surcos de 90 cm con densidad lineal de 3.5 plantas m⁻¹.

La programación del riego se realizó mediante el sistema de pronóstico del riego en tiempo real “SPRITER-FAO”, este programa utiliza el tiempo transcurrido basado en días calendario y parámetros empíricos de acuerdo a la metodología de la FAO (Doorenbos y Kassam, 1986), por lo que se aplican ajustes manuales en la duración de las fases fenológicas conforme se actualiza la información climática y de humedad (Ojeda, *et al.*, 2007). Las variables meteorológicas usadas, promediadas a intervalos de 15min, fueron: temperatura y humedad ambiental, radiación solar, velocidad del viento y precipitación.

Cuadro 5. Información de las parcelas comerciales utilizadas

| Parcela | Estación | Sup.(ha) | Rend. ton ha ⁻¹ | F/S | Días a desvare |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------------|
| Torres | *SR-1 | 78 | 34 | 19-11-05 | 110 |
| Pinera | *SR-1 | 55 | 38 | 10-11-05 | 108 |
| Vargas | *SR-2 | 48 | 30 | 08-10-05 | 112 |
| Las30 | *SR-1 | 29 | 35 | 16-12-05 | 107 |
| Vargas(06) | *SR-2 | 48 | 28 | 13-10-06 | 108 |
| Cave | +SR-1 | 10 | 30 | 03-10-05 | 110 |
| Olivas | +SR-1 | 118 | 53 | 03-12-05 | 107 |
| Guamúchil | +TX | 16 | 32 | 05-12-05 | 108 |

| Parcela | Estación | Sup.(ha) | Rend. ton ha ⁻¹ | F/S | Días a desvare |
|-----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------------|
| Chispas | +TX | 15 | 30 | 22-12-05 | 109 |
| El campo | +TX | 20 | 40 | 21-12-05 | 108 |
| Zapotillo | +TX | 104 | 38 | 21-11-05 | 112 |
| Epa1 | +SR-1 | 9 | 40 | 10-10-05 | 114 |
| Epa2 | +SR-1 | 5 | 30 | 06-10-05 | 110 |
| Epa3 | +SR-1 | 10 | 30 | 07-10-05 | 111 |
| E9d1 | +SR-1 | 10 | 30 | 05-10-05 | 112 |
| E9d2 | +SR-1 | 10 | 35 | 11-10-05 | 114 |
| Efm1 | +SR-1 | 18 | 20 | 14-10-05 | 115 |
| Efm2 | +SR-1 | 18 | 25 | 17-11-05 | 109 |
| E9d2 | +SR-1 | 10 | 20 | 06-11-06 | 106 |
| Efm2 | +SR-1 | 18 | 23 | 10-11-06 | 107 |

*Nota; Rend. ton ha⁻¹; Rendimiento en toneladas por hectárea. F/S; Fecha de siembra. F/D; El Desvare consiste en eliminar artificialmente el follaje del cultivo cuando se alcanza el tamaño de tubérculo deseado. * Parcelas regadas bajo riego por aspersion. + Parcelas regadas bajo riego por superficie.*

Se consideraron cinco etapas fenológicas (**Cuadro 6**) para describir el crecimiento y desarrollo del cultivo de papa de acuerdo a Rowe (1993).

Cuadro 6. Etapas fenológicas de la papa de acuerdo a Rowe (1993).

| Clave/Etapa | Descripción |
|---------------------------|---|
| E1/Brotación | Desarrollo de los brotes de los ojos del tubérculo-semilla, que emergen sobre la superficie del suelo |
| E2/Crecimiento vegetativo | Estado en que las hojas, ramas y tallos se desarrollan sobre las superficies del suelo. Comienza la fotosíntesis y los procesos de producción de carbohidratos |
| E3/Estolonización | Se forman tubérculos a partir de la punta del estolón. Generalmente este periodo tiene una duración de 10 a 14 días. |
| E4/Tuberización | Las células del tubérculo se expanden con la acumulación de agua, nutrientes y carbohidratos. Después de su iniciación, el tubérculo de papa se desarrolla de manera continua, tanto morfológica como |

| Clave/Etapa | Descripción |
|---------------|--|
| E5/Maduración | fisiológicamente El follaje entra rápidamente en proceso de senescencia, éste cambia a color amarillo, la fotosíntesis decrece gradualmente y el follaje eventualmente muere. |

Las unidades calor y posteriormente los días grado desarrollo ($^{\circ}$ D) son la formas más comunes para expresar el tiempo térmico. Una unidad calor se define cuando la temperatura media diaria es mayor en un grado que la temperatura basal del cultivo (T_b). Al incluir una temperatura superior $T_{superior}$, $^{\circ}$ D definen un intervalo de temperatura donde el cultivo se desarrolla. La tasa de desarrollo se relaciona directamente con las temperaturas: basal (T_b) y superior ($T_{superior}$). Por debajo de T_b el cultivo no se desarrolla y por arriba de $T_{superior}$ la tasa de desarrollo del cultivo disminuye drásticamente (Summerfield *et al.*, 1991; Krause et, al., 2005). Los métodos para el cálculo de $^{\circ}$ D se pueden clasificar en varios grupos; los métodos cerrados utilizan las dos temperaturas (T_b y $T_{superior}$) para acotar la temperatura donde se desarrolla el cultivo. Otros métodos son abiertos y solo utilizan la temperatura T_b y no se acotan con la introducción de la temperatura superior $T_{superior}$. Un tercer tipo de métodos más sofisticados, como el método de los P-días, definen una zona de temperatura optima además de acotar la región de la temperatura, T_b y $T_{superior}$ (Sands *et al.*, 1979).

La estimación del tiempo térmico para la fenología registrada en campo fueron procesados por diez métodos descritos en el **Cuadro 7**. Para el cultivo de papa, se utilizaron las temperaturas cardinales de 2° C como T_b y 29° C como ($T_{superior}$) ya que de acuerdo a resultados experimentales y analizando una serie de temperaturas cardinales, son las recomendables para estimar el tiempo térmico con fines de predicción fenológica.

Cuadro 7. Métodos usados para el cálculo de $^{\circ}$ D en el cultivo de papa para el norte de Sinaloa

| Método | Descripción |
|---------|--|
| M1 | $^{\circ}D = (T_{med} - T_b)$, Si $T_{med} < T_b$ $^{\circ}D = 0$, Si $T_{med} > T_{superior}$ $^{\circ}D = T_{superior} - T_b$ (Dufault, 1997) |
| M2- P-D | $P - days = \frac{1}{24} [5P(T_{min}) + 8P\left(\frac{2T_{min}+T_{max}}{3}\right) + 8P\left(\frac{T_{min}+2T_{max}}{3}\right) + 3P(T_{max})]$ (Sands et al., 1979) |
| M3 | $^{\circ}D = (T_{med} - T_b)$, Si $T_{max} < T_b$ entonces $^{\circ}D = 0$, si $T_{min} < T_b$ entonces T_{min} se igualara a T_b (McMaster y Wilhelm, 1997) |
| M4 | $^{\circ}D = (T_{max} - T_b)$, Si $T_{min} < 0$ entonces $^{\circ}D = 0$ (Villorbon et al 2009), |
| M5 | $^{\circ}D = (T_{med} - T_b)$, Si $T_{max} > T_{superior}$ entonces $^{\circ}D = (T_{superior} + T_{min})/2 - T_b$, donde Si $T_{min} < 0$ $^{\circ}D = 0$ (Villorbon et al., 2009) |
| M6 | $^{\circ}D = T_{max} - T_b$, donde Si $T_{max} > T_{superior}$ entonces $^{\circ}D = T_{superior} - T_b$, y Si $T_{min} < 0$ entonces $^{\circ}D = 0$ (Villorbon et al., 2009) |
| M7 | $^{\circ}D = (T_{med} - T_b)$, donde Si $T_{max} > T_{superior}$ entonces $T_{max} adj = (T_{superior} - (T_{max} - T_{superior}))$ y $^{\circ}D = \{(T_{max} adj + T_{min}) / 2\} - T_b$, y Si $T_{min} < 0$ $^{\circ}D = 0$ (Villorbon et al., 2009) |
| M8 | $^{\circ}D = (T_{max} - T_b)$, donde Si $T_{max} > T_{superior}$ entonces $T_{max} adj = (T_{superior} - (T_{max} - T_{superior}))$ y $^{\circ}D = (T_{max} adj - T_b)$ y Si $T_{min} < 0$ $^{\circ}D = 0$ (Villorbon et al., 2009) |
| M9- S/S | Método triangular utilizando el software degree day calculator (UC IPM, 2008) |
| M10T/S | Método senoidal utilizando el software degree day calculator (UC IPM, 2008) |

Nota; M2; $P=0$ si $T < 7$ o $T \geq 30$ "o", $P = K \left[1 - \frac{(T-21)^2}{(21-7)^2} \right]$ si $7 \leq T < 21$ "o", $P = K \left[1 - \frac{(T-21)^2}{(30-21)^2} \right]$ si $21 \leq T < 30$, $K =$ factor con valor de 10. M 9 Triangulo simple = Este método utiliza todos los días T_{min} y T_{max} para producir un triángulo equilátero sobre un período de 24-h. $^{\circ}D$ fueron estimados mediante el cálculo del área entre los dos umbrales que está encerrado por el triángulo. M 10 seno simple = Esta técnica utiliza diariamente T_{min} y T_{max} para producir una curva sinusoidal durante un período de 24-h.

Para definir el mejor método, se seleccionó el método que produjera la menor dispersión de acuerdo a siete parámetros estadísticos como se indica en el **Cuadro 7**, para cada una de las etapas fenológicas para los 10 métodos estudiados. La variabilidad de cualquier distribución se contempla generalmente en términos de la desviación de cada valor observado con respecto a la media muestral (Willmott 2005). La importancia en la utilización de la dispersión de la distribución está basada en que permite estimar la confiabilidad de la medida de tendencia central. Además se pueden comparar las dispersiones de varias muestras, por lo cual a mayor dispersión se tendrá menor certidumbre del método (Willmott 2005).

Fox (1981) recomienda cuatro tipos de estimadores de desempeño (MAE, RMSE, MBE y Sd^2) que deben ser utilizadas en conjunto para un mejor análisis de datos ya que cada una de ellas tiene una aplicabilidad; MAE es sensible a los valores extremos, RMSE debe añadirse ya que evita la exponenciación físicamente artificial. Por otro lado MBE es una medida similar y es apropiado, en muchos casos, el reporte de uno o

ambos índices. Los dos primeros momentos de la distribución de las diferencias (MBE y sd²), por si solos no proporcionan un valor de desempeño de los métodos. Debido a lo anterior y la facilidad para aplicarlos, los cuatro parámetros de desempeño de modelos descritos anteriormente son empleados en la mayoría para definir estadísticamente el mejor método de estimación.

Cuadro 8. Parámetros de dispersión utilizados para evaluar el desempeño de métodos.

| Parámetro | Clave | Ecuación |
|---|-----------------|---|
| Desviación Estándar | DESVEST | $\sum_{i=1}^N \left(\frac{(O_j - O)^2}{N - 1} \right)^{1/2}$ |
| Coficiente de variación | CV | $\frac{DESVEST_j}{\bar{x}}$ |
| Coficiente d (adimensional) | D | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (1P'_{il} - 1O'_{il})^2}$ |
| Media de error del sesgo | MBE | $N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_j - O)$ |
| Variación de la distribución de las diferencias | Sd ² | $(N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i - MBE)^2$ |
| Raíz Media del Cuadrado del Error | RMSE | $RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5}$ |
| Errores medios con valores absolutos (Willmott 1981). | MAE | $MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N abs (P_i - O_i)$ |

Nota: P_j y O_i son los valores predichos y observados, respectivamente, N es el número de observaciones realizadas.

Debido a que los métodos estiman °D de distinta manera, se realizó una normalización para cada método de los valores estimados con respecto al valor más alto registrado en °D a lo largo del ciclo del cultivo. De igual forma para la comparación de datos observados contra predichos, estos últimos se tomaron a partir de la obtención de la media de valores observados en campo. Las dos variedades de papa utilizadas (Alpha y Atlantic) son muy similares en su desarrollo fenológico por lo que fueron analizadas en forma conjunta ya que no se encontraron diferencias significativas entre ellas que indicaran un análisis independiente.

Se estimaron los distintos parámetros estadísticos indicados en el **Cuadro 8** que indican que el método M6 presentó mejor desempeño para los indicadores DESV y CV (**Cuadro 9**), presentando los valores más bajos en cuatro de las 5 etapas fenológicas analizadas; fue solo en la etapa 4 donde resultó superado por el método M2 con diferencias mínimas entre ellos (0.009) esto para DESV.

El CV mostró una mejor interpretación del grado de variabilidad de los métodos, se encontraron resultados idénticos a los obtenidos en DESV ya que el método 6 obtuvo el menor CV en todas las etapas excepto en la 4 donde el M2 lo supero obteniendo 7.93% contra 8.9% del M6. Se utilizó el índice d con la finalidad de corroborar los resultados de DESVES y CV, este parámetro arrojó valores muy cercanos al 1.0 por lo que los datos analizados muestran gran dispersión entre predichos y observados, a pesar de ello se logro confirmar mediante este lo mostrado por la DESV y CV ya que corroboro que el M6 es el mejor a la hora de calcular los °D para este ejemplo.

Cuadro 9. Valores de DESV, CV e índice d para cada uno de los métodos.

| Etapa/Parámetro | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E1/Desv | 0.068 | 0.045 | 0.068 | 0.052 | 0.067 | 0.039 | 0.049 | 0.068 | 0.063 | 0.065 |
| CV | 24.16 | 19.34 | 24.24 | 18.65 | 24.31 | 14.11 | 17.78 | 24.0 | 22.5 | 23.1 |
| D | .9957 | .9896 | .9957 | .9898 | .9954 | .9722 | .9902 | .9956 | .9943 | .9998 |
| E2/Desv | 0.020 | 0.013 | 0.020 | 0.016 | 0.022 | 0.012 | 0.014 | 0.020 | 0.019 | 0.019 |
| CV | 21.36 | 14.77 | 21.42 | 16.69 | 23.21 | 12.21 | 14.83 | 21.31 | 19.84 | 20.38 |
| D | .9965 | .9877 | .9965 | .9928 | .9969 | .9766 | .9895 | .9964 | .9956 | .9959 |
| E3/Desv | 0.098 | 0.062 | 0.099 | 0.073 | 0.118 | 0.047 | 0.061 | 0.098 | 0.090 | 0.093 |
| CV | 17.61 | 11.69 | 17.66 | 12.82 | 21.34 | 8.26 | 10.98 | 17.57 | 16.15 | 16.71 |
| D | .9989 | .9962 | .9989 | .9974 | .9990 | .9898 | .9963 | .9989 | .9987 | .9988 |
| E4/Desv | 0.117 | 0.051 | 0.117 | 0.089 | 0.142 | 0.060 | 0.076 | 0.116 | 0.108 | 0.111 |
| CV | 17.70 | 7.93 | 17.75 | 13.19 | 21.78 | 8.90 | 11.44 | 17.65 | 16.34 | 16.86 |
| D | .9988 | .9890 | .9988 | .9974 | .9994 | .9911 | .9960 | .9988 | .9985 | .9987 |
| E5/Desv | 0.113 | 0.064 | 0.114 | 0.081 | 0.136 | 0.052 | 0.074 | 0.113 | 0.105 | 0.108 |
| CV | 13.12 | 6.99 | 13.16 | 8.94 | 16.11 | 5.70 | 8.37 | 13.09 | 12.06 | 12.47 |
| D | .9994 | .9951 | .9994 | .9983 | .9997 | .9941 | .9979 | .9994 | .9992 | .9993 |

Nota; Desv; valor expresado en GDD, CV; valor expresado en % de variación con respecto a la media. M1-M10; métodos enumerados del 1-10 utilizados en el experimento. M8; Método denominado P-Days, M9; método denominada Seno simple, M10; método denominada Triangulo sencillo.

Analizando las repeticiones comparadas contra un testigo (media de las repeticiones) para obtener así valores predichos y observados con la finalidad de obtener la variabilidad de cada método a la hora de pronosticar el número de °D en cada etapa fenológica.

Los resultados obtenidos en la etapa 1, la cual presenta el mayor número de días en duración, muestran al M7 como el mejor en los parámetros de Sd^2 , RMSE y MAE. Este método se adapta de buena forma a esta etapa del cultivo ya que entre sus cálculos realiza un ajuste de T_{max} cuando se presenta la condición de que esta supera la $T_{superior}$, esto debido principalmente a las condiciones de temperatura promedio para las fechas en las que se presenta esta etapa ya que regularmente el cultivo es establecido a mediados de octubre fechas en las que prevalecen temperaturas máximas superiores a la $T_{superior}$ del cultivo. Para este análisis el M5 resultó el mejor en la mayoría de las etapas fenológicas. MBE mostró el error de sesgo para cada método mostrando lo sobreestimado (+) o subestimado (-) con respecto al valor observado, para la etapa 1 el M5 obtuvo el menor error (MBE) así como el M7 resultó como el mejor para el resto de los parámetros (Sd^2 , RMSE y MAE) esto debido a que el M7 realiza un ajuste al presentarse una T_{max} mayor a la $T_{superior}$ por lo que tomando en cuenta las condiciones medias de temperatura durante la primera etapa del cultivo el M7 realiza un mejor cálculo. Para la etapa 2 el M5 fue el mejor excepto en el parámetro Sd^2 . En la etapa 3 el M3 resultó favorecido en todos los parámetros excepto MBE. En la etapa 4 y 5 nuevamente el M5 se vio favorecido en los parámetros utilizados

Lo anterior indica que el M5 fue el mejor al comparar datos predichos contra observados ya que obtuvo mejores resultados en la mayoría de las etapas para los diferentes parámetros.

Cuadro 10; Valores de MBE, Sd^2 , RMSE y MAE para cada uno de los métodos.

| Etapa/Parámetro | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| E1 MBE(-) | 0.0025 | 0.0069 | 0.0025 | 0.0032 | 0.0017 | 0.0043 | 0.0040 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0027 |
| Sd^2 | 0.0072 | 0.0070 | 0.0071 | 0.0073 | 0.0071 | 0.0071 | 0.0069 | 0.0072 | 0.0075 | 0.0071 |
| RMSE | 0.0313 | 0.0315 | 0.0312 | 0.0320 | 0.0312 | 0.0315 | 0.0304 | 0.0314 | 0.0326 | 0.0312 |
| MAE | 0.0246 | 0.0251 | 0.0245 | 0.0252 | 0.0245 | 0.0251 | 0.0243 | 0.0246 | 0.0254 | 0.0246 |
| E2 MBE | -0.0021 | -0.0069 | -0.0021 | -0.0020 | 0.0001 | -0.0032 | -0.0037 | -0.0021 | -0.0024 | -0.0022 |

| Etapa/Parámetro | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sd2 | 0.0088 | 0.0098 | 0.0088 | 0.0089 | 0.0088 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0088 | 0.0089 | 0.0089 |
| RMSE | 0.0384 | 0.0434 | 0.0383 | 0.0387 | 0.0382 | 0.0396 | 0.0395 | 0.0385 | 0.0387 | 0.0387 |
| MAE | 0.0301 | 0.0340 | 0.0300 | 0.0305 | 0.0292 | 0.0311 | 0.0309 | 0.0301 | 0.0303 | 0.0302 |
| E3 MBE | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0018 | 0.0031 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0017 |
| Sd2 | 0.0059 | 0.0064 | 0.0058 | 0.0063 | 0.0066 | 0.0065 | 0.0061 | 0.0059 | 0.0059 | 0.0059 |
| RMSE | 0.0256 | 0.0280 | 0.0255 | 0.0275 | 0.0288 | 0.0285 | 0.0266 | 0.0256 | 0.0259 | 0.0258 |
| MAE | 0.0195 | 0.0216 | 0.0195 | 0.0209 | 0.0211 | 0.0217 | 0.0204 | 0.0196 | 0.0198 | 0.0197 |
| E4 MBE | -0.0049 | -0.0067 | -0.0049 | -0.0060 | -0.0046 | -0.0065 | -0.0055 | -0.0050 | -0.0051 | -0.0050 |
| Sd2 | 0.0071 | 0.0093 | 0.0071 | 0.0076 | 0.0064 | 0.0081 | 0.0078 | 0.0071 | 0.0073 | 0.0072 |
| RMSE | 0.0314 | 0.0412 | 0.0313 | 0.0337 | 0.0284 | 0.0361 | 0.0345 | 0.0315 | 0.0321 | 0.0318 |
| MAE | 0.0259 | 0.0333 | 0.0258 | 0.0279 | 0.0236 | 0.0298 | 0.0283 | 0.0260 | 0.0264 | 0.0263 |
| E5 MBE | 0.0047 | 0.0070 | 0.0047 | 0.0047 | 0.0040 | 0.0050 | 0.0052 | 0.0047 | 0.0054 | 0.0048 |
| Sd2 | 0.0053 | 0.0072 | 0.0053 | 0.0057 | 0.0047 | 0.0062 | 0.0058 | 0.0053 | 0.0053 | 0.0053 |
| RMSE | 0.0235 | 0.0320 | 0.0234 | 0.0254 | 0.0208 | 0.0274 | 0.0259 | 0.0235 | 0.0235 | 0.0238 |
| MAE | 0.0189 | 0.0253 | 0.0189 | 0.0207 | 0.0168 | 0.0223 | 0.0209 | 0.0190 | 0.0188 | 0.0192 |

Nota; MBE; Error de sesgo, Sd²; Variación entre diferencias, RMSE; Error medio cuadrático, MSE; Diferencia entre valores absolutos. M1-M10; Métodos enumerados del 1-10 utilizados en el experimento.

Los resultados indican que de los métodos alternativos para el cálculo de °D acumulados por etapa fenológica, el M6 es el mejor al evaluar la dispersión de los datos ya que obtuvo un CV bajo y la menos DESV, al utilizar los parámetros que incluyen valores predichos contra observados el M5 resultó como el mejor al obtener una reducida RMSE en relación con M1 descrito anteriormente como el método estándar en el cálculo de °D. A pesar de haber sido estos los mejores métodos no se logró obtener una dispersión ni diferencia de cero debido a diferentes motivos; el manejo que se le da a cada uno de los lotes experimentales teóricamente es el mismo variando en cuestiones de tipo y homogeneidad de suelo principalmente, lo que causa entre otras cosas diferencias en contenido de humedad y absorción de nutrientes que afectan directamente el desarrollo fenológico del cultivo variando así la acumulación de °D en cada etapa. Los modelos fueron evaluados bajo múltiples enfoques (es decir, el mínimo CV, MBE, Sd², RMSE y MAE), catalogando así al mejor método predictivo para °D aplicados al cultivo de papa en la zona norte del Estado de Sinaloa.

El uso de DESVEST sirvió para cuantificar la exactitud de los modelos candidatos. RMSE se utilizó ya que esta es generalmente considerada como la medida más robusta de predicción global del desempeño del modelo (Schwartz *et al.*, 1997). De acuerdo a nuestros resultados la utilización de T_b y $T_{superior}$ no garantizan la exactitud del modelo ya que el M6 el cual resultó como el mejor para los parámetros DESV y CV utiliza T_b como límite inferior y se rige por la Temperatura máxima del día a la hora de realizar el cálculo, esto sin incluir $T_{superior}$, es importante mencionar que a pesar de que M6 fue el mejor para estos parámetros, el M2 P-Days que además de utilizar T_b y $T_{superior}$ distintas a las empleadas en los otros métodos (2°C y 29°C respectivamente) incluye entre sus ecuaciones una temperatura óptima de crecimiento del cultivo por lo que cabe señalar que apenas se vio superado por lo que se consideró un buen método para el cálculo de °D. A continuación se muestra en la **(Cuadro 11)** los valores expresados en °D para cada una de las etapas fenológicas utilizando el M6 y M5 y M2.

Cuadro 11. Valor en °D de cada una de las etapas fenológicas para el M6, M5 y M2.

| ETAPA | M6 | M5 | M2 |
|-------------------------------------|------|------|-----|
| 1.-Aparición y Expansión de Retoños | 464 | 424 | 111 |
| 2.-Emergencia y Expansión de Tallos | 696 | 627 | 177 |
| 3.-Estolonización | 961 | 851 | 253 |
| 4.-Inicio de Tuberización | 1131 | 1002 | 308 |
| 5.-Desarrollo de Tubérculos | 1552 | 1297 | 434 |

A continuación se presenta el **Cuadro 12** en el cual se muestra un resumen de los resultados indicando el mejor método por etapas para cada uno de los parámetros utilizados.

Cuadro 12. Cuadro resumen que indica cual método obtuvo los mejores resultados por etapas en cada uno de los parámetros utilizados

| Etapas | DESV | CV | MBE | Sd ² | RMSE | MAE |
|--------|------|----|-----|-----------------|------|-----|
| E1 | M6 | M6 | M5 | M7 | M7 | M7 |
| E2 | M6 | M6 | M5 | M3 | M5 | M5 |
| E3 | M6 | M6 | M2 | M3 | M3 | M3 |

| Etapas | DESV | CV | MBE | Sd² | RMSE | MAE |
|---------------|-------------|-----------|------------|-----------------------|-------------|------------|
| E4 | M2 | M2 | M5 | M5 | M5 | M5 |
| E5 | M6 | M6 | M5 | M5 | M5 | M5 |
| Más frecuente | M6 | M6 | M5 | M5-M3 | M5 | M5 |

De acuerdo a el cuadro anterior se aprecia como en los parámetros de DESV y CV el M6 solo se vio superado por el M2 en la etapa 4 debido esto, a que esta es la etapa con menor duración en días a lo largo del ciclo de producción por lo que la acumulación de °D no es en cantidad considerable resultando obvio que el M2 que utiliza mas parámetros en sus cálculos superara al primero.

El M5 se mostro como el mejor en la mayoría de los parámetro al comparar datos predichos contra observados pero de igual forma métodos como el M3 y M7 se presentaron como los mejores en algunos de estos. Nuestros resultados son consistentes con los informes anteriores de que sólo las unidades calor no puede explicar de forma total el desarrollo de un cultivo (Arnold 1959), así como sugerir que una T_{base} para una unidad de calentamiento lineal no puede ser idéntico con todo de los requisitos fisiológicos de la planta. Teniendo en cuenta todos esto en y utilizando un diferente método de cálculo de °D podría conducir a la programación más precisa de gestión de tiempo en actividades críticas (por ejemplo, la cosecha y prueba de esta).

Conclusiones; Se recomienda utilizar el método M5 en cuestiones de comparación de datos entre si y el M6 para comparar datos predichos contra observados, ambos son métodos que no cuentan con $T_{superior}$ que los limite si no que utilizan la T_{media} y T_{max} para realizar los cálculos respectivamente, lo anterior si la zona de estudio presenta T_{max} muy similares a la $T_{superior}$ del cultivo a lo largo de todo su ciclo. Teniendo todo esto en consideración y utilizando un diferente método al estándar para el cálculo de °D se podría dar lugar a la utilización de métodos más precisos para la predicción en la acumulación de °D en el cultivo de papa ayudando en la gestión de actividades como la cosecha y manejo de etapas críticas. Los modelos utilizados en este estudio resultaron con buena adaptación a la gama de entornos del sitio del experimento, de manera que hasta cierto punto, estos modelos pueden ser calibrados para uso en otros lugares fuera de la zona de Los Mochis Sinaloa.

3.4. Obtención de datos climáticos

Actualmente el estado de Sinaloa cuenta con 54 estaciones meteorológicas, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo y ancho del estado, la distribución de las estaciones meteorológicas fue planeada y realizada para dar información de las áreas agrícolas del estado. En la **Figura 9** se puede observar la distribución de las estaciones de la red del estado de Sinaloa, que incluye el Distrito de Desarrollo Rural Los Mochis lugar donde se desarrollo el experimento ubicado en la parte norte de Sinaloa. La estación meteorológica utilizada fue la estación Juan José Ríos (Cevaf). Esta red brinda servicio de información climática a los productores agrícolas de la región, a través de la pagina de internet: <http://www.ciad.edu.mx/clima/pc.asp>.



Figura 9. Distribución de las estaciones meteorológicas del estado de Sinaloa

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la red del estado de Sinaloa (**Figura 9**) se caracterizan por ser un dispositivo portátil con sensores que responden a estímulos electrónicos, con capacidad de registrar y coleccionar información meteorológica en tiempo real. Las variables climáticas que miden son: Temperatura, Humedad Relativa,

Radiación Solar, Velocidad del Viento, Dirección del viento, Precipitación, Temperatura del Suelo, Humedad del Suelo, Follaje Mojado.

Cuentan además con un dispositivo de almacenamiento y transmisión de datos el cual se compone de un dataloger o módulo de almacenamiento que permite registrar y guardar datos, y un módem telefónico celular encargado de la transmisión de datos a la base de la red meteorológica.

3.5. Parametrización de cultivos

Para la obtención de los parámetros de cultivos, se utilizo el paquete tecnológico utilizado en la zona norte del estado de Sinaloa donde se describe el manejo agronómico aplicado, así como también se describen los métodos utilizados en la obtención de datos de producción de biomasa y seguimiento del riego.

3.5.1. Manejo agronómico

La preparación del terreno fue de manera convencional. Para el caso del cultivo de frijol, se utilizo sistema de riego por goteo, se aplicó un riego de germinación, ya que ésta se realizó en seco. Para el cultivo de papa se aplico un riego presiembra al suelo con la finalidad de proporcionar la humedad necesaria para la germinación. La semilla de frijol utilizada fue de calidad certificada de variedad Azufrado Higuera, y variedad alpha para el cultivo de papa. El manejo de plagas, enfermedades y fertilización se realizó de acuerdo a monitoreo y diagnóstico por investigadores del INIFAP CEVAF. Los requerimientos productivos y manejo agronómico del cultivo de frijol se presentan en los **Cuadros 13 y 14**, de igual forma los **Cuadros 15 Y 16** muestran respectivamente los pertenecientes al cultivo de papa.

Cuadro 13. Requerimientos productivos del frijol en la zona norte del estado de Sinaloa

| Variable | Descripción | Especificaciones |
|-----------------------|--------------------------------|--|
| Sistema de producción | Trazo de surcos y distribución | En suelos arcillosos se sugiere una separación entre surcos de 70-80 cm, para variedades de crecimiento determinado tipo mata, además se |

| | | |
|--------------------|---|---|
| | de semilla | puede emplear el método de camas de 1 m con separación entre hileras de 40 cm, para variedades de tipo de crecimiento de semiguía se utiliza la separación entre hilera de 80 a 92 cm. |
| Área de influencia | Ahome, El Fuerte, Guasave y Sinaloa de Leyva | Ahome, Guasave y El Fuerte son los municipios que mayor superficie registra con 74,139 ha en modalidad de riego, así mismo son los municipios que obtienen los mejores rendimientos con un promedio de 1.9 ton ha ⁻¹ . |
| Época de siembra | Fechas de siembra del cultivo para el ciclo OI. | Para las variedades de grano negro, se sugiere sembrar del 25 de septiembre al 15 de octubre, para las de tipo Azufrado Peruano del 5 de octubre al 10 de noviembre y para las variedades tipo Azufrado regional del 1 de octubre al 5 de noviembre. |
| Desglose de costos | Desglose de costos en porcentajes | Preparación del terreno 18 %, Siembra 19 %, Fertilización 20 %, Labores culturales 5 %, Riegos 6 %, Control integral de plagas y enfermedades 8 %, Cosecha 11 %, Diversos 13 %, Costo total del cultivo \$16,110 (2009-2010). (Por dicha distribución se reflejan los altos costos de la producción). |

El cultivo de frijol presenta alta sensibilidad a excesos de humedad en el suelo, estos excesos hídricos pueden provocar enfermedades como el Moho Blanco, pudriciones de raíz y tallo y bacteriosis, mismas que afectan directamente la producción del cultivo, la eficiente aplicación del riego es una acción que define su desarrollo y rendimiento óptimo; la eficiencia del riego en la zona es del 35-45 % bajo el sistema de gravedad, que es el más empleado.

Cuadro 14. Manejo agronómico del cultivo de frijol en la zona norte del estado de Sinaloa

| Concepto | Descripción |
|-------------------------|---|
| Preparación del terreno | El cultivo puede establecerse tanto en suelos de aluvión como de barrial, con labranza completa (barbecho o subsuelo, rastreo, nivelación, marca y escarificación) así como con labranza mínima, por lo regular se establece después de siembras de sorgo, lo cual obliga a realizar labranzas completas, cuando la siembra es después de maíz se puede utilizar la labranza mínima o reducida. |
| Siembra | Se realiza comúnmente con sembradoras de precisión con el fin de lograr una densidad de siembra de 18-22 semillas m ⁻¹ , en hilera sencilla, mientras que en doble hilera se siembran de 12-14 semillas, buscando así que germinen aproximadamente 200,000 plantas ha ⁻¹ . Efectuándose esta en húmedo, previo a un riego de presembrado. Y la semilla debe colocarse en la zona húmeda de la cama de siembra. |
| Riego | Para un buen desarrollo del cultivo no debe faltar humedad en las etapas críticas, las cuales comprenden desde la etapa fonológica de la floración hasta el llenado del grano. En suelos arcillosos (barrial), dos riegos de auxilio son suficientes para las variedades intermedias y precoces, uno al inicio de la floración a los 45-50 días después de siembra y el segundo en la formación de vainas a los 60 días aproximadamente, en suelos francos (aluvión), se debe aplicar el mismo tratamiento de riegos; mientras que en los materiales tardíos (grano negro), se requiere un riego adicional entre 75-80 días, en caso de presentarse lluvias invernales (equipatas), dicho riego puede omitirse. |
| Fertilización | Además de los suministros aportados por la relación simbiótica de la planta ya que se debe tomar en cuenta la posible fijación atmosférica de nitrógeno por bacterias del género Rhizobium; en siembras después de sorgo y maíz se sugiere aplicar de 100- |

| Concepto | Descripción |
|------------------------------|---|
| | <p>120Kg ha⁻¹ de nitrógeno y en rotación con otra leguminosa aplicar de 60-80Kg ha⁻¹. En caso de contar con análisis de suelo basarse en este para determinar las dosis de fertilización.</p> |
| <p>Plagas y enfermedades</p> | <p>Plagas:</p> <p>Mosquita blanca (<i>Bemisia tabaci</i> Gennadius) y (<i>B. argentifolii</i> Bellows & Perring). La importancia de la mosquita blanca en el cultivo del frijol se debe a su capacidad para transmitir el complejo de virus (virus del mosaico dorado, del clorótico, rugoso y cálico). La mayor población de este insecto ocurre durante el verano (julio-septiembre) y decrecen en el invierno (a partir de octubre), por lo que las fechas de siembra son determinantes para reducir riesgos de daño por el insecto como vector.</p> <p>Chicharrita (<i>Empoasca</i> spp.). Los adultos miden unos tres milímetros de largo, son alargados y de color verde tierno; insertan sus huevecillos a lo largo de las nervaduras en el envés de las hojas. Las ninfas nacen a los pocos días y pasan por cinco instares. Son de color blanco sucio y, al igual que los adultos, chupan la savia de las hojas, la planta detiene su crecimiento y decrece la producción de ejote y calidad del grano.</p> <p>Trips (<i>Caliothrips phaseoli</i> Hood). Los huevecillos son insertados en los tejidos del envés de las hojas; las ninfas raspan y chupan las hojas, produciéndoles cicatrices que le dan un aspecto cenizo. Posteriormente, las hojas muy atacadas se tornan de color cobrizo y después se acartonan; pueden ocasionar la defoliación prematura de la planta.</p> <p>Diabrotica (<i>Diabrotica balteata</i> Leconte). El adulto mide unos seis milímetros de largo y es de color verde claro con bandas amarillentas transversales en los élitros. Ocasionalmente se presenta en infestaciones altas, que causan daño al frijol antes de</p> |

| Concepto | Descripción |
|----------|--|
| | <p>floración.</p> <p>Enfermedades:</p> <p>Mosaico dorado. Esta enfermedad es causada por el virus del mosaico dorado del frijol (BGMV), es el virus más importante en la región ya que puede ocasionar pérdidas en el cultivo de 25-95%; su intensidad depende en gran parte de las poblaciones de mosca blanca que se encuentren en el cultivo o cerca de él. Ataca a todas las variedades.</p> <p>Mosaico común. Esta enfermedad es causada por el virus del mosaico común del frijol (BCMV), es el patógeno viral más importante de este cultivo, debido a que puede ser transmitido en un alto porcentaje, mecánicamente por la semilla y por varias especies de áfidos. Un promedio de 35% de las semillas producidas por una planta infectada antes de la floración podrían dar origen a plantas con mosaico común.</p> <p>Mosaico enano. Esta enfermedad es causada por el virus del mosaico enano del frijol (BDMV) y es transmitido por mosquita blanca. Esta enfermedad no es de importancia económica debido a que se ha presentado con incidencias muy bajas. Para prevenir la presencia de esta enfermedad es necesario manejar la población del insecto vector, utilizar variedades tolerantes y sembrar en la época antes mencionada.</p> <p>Bacteriosis. Esta enfermedad se ha detectado cuando se presentan condiciones ambientales húmedas y cálidas, con neblinas y precipitaciones fuertes. Puede ocasionar pérdidas de 20-60% en el rendimiento del cultivo. Para prevenir su ataque se debe utilizar semilla producida en lotes libres de bacterias fitopatógenas, además se sugiere barbechar para colocar residuos infectados en un estrato inferior y rotar con cultivos tolerantes.</p> |

| Concepto | Descripción |
|----------------------|---|
| | <p>Moho blanco (<i>Sclerotinia</i> Whetzelinia) (<i>sclerotiorum</i> Lib. De By). La enfermedad se inicia generalmente durante la floración, cuando hay suficiente follaje que permite una mayor retención de humedad en torno a la planta. Se identifica por el crecimiento algodonoso de color blanco que cubre la superficie o el interior de porciones de ramas, vainas y hojas. Las vainas, tallos y ramas se marchitan, por lo que causan una reducción en el tamaño de la semilla. Las vainas en contacto con el suelo se infectan rápidamente. Cuando hay suficiente humedad en la atmósfera, las lesiones en las diferentes partes de la planta se cubren con la masa del micelio de color blanco, característica del hongo.</p> <p>Roya o Chahuixtle (<i>Uromyces phaseoli</i> var. <i>typica</i>). Esta enfermedad se presenta en variedades criollas sobre todo al sembrarlas en fechas tardías. Pueden defoliar prematuramente la planta y con ello reducir el tamaño de vainas y granos que se refleja en baja de producción. El hongo ataca las hojas y es más abundante y notorio en el envés, pero también invade vainas y tallos. Los primeros síntomas aparecen como pequeños puntos amarillo pálido, que son las pústulas. El hongo sobrevive como uredosporas o teliosporas.</p> |
| Cosecha y poscosecha | Inicia al presentarse la madurez fisiológica de la planta, la cual se realiza en tres fases: arranque, enchorizado y trilla; existen equipos que realizan el arranque y enchorizado al mismo tiempo, regularmente se forman chorizos de 8 y 12 surcos. La trilla se realiza al contar con un porcentaje de humedad de 12-14 %. |

Cuadro 15. Requerimientos productivos de la papa en la zona norte del estado de Sinaloa

| Variable | Descripción | Especificaciones |
|------------------------|-----------------------------------|---|
| Sistemas de producción | Trazo de surcos | La papa comúnmente se siembra a 90 cm de separación entre surcos, distanciamiento que facilita la cosecha mecánica. |
| Área de influencia | Ahome, El Fuerte y Guasave. | Las áreas potenciales para este cultivo son el municipio de Ahome y Guasave, mientras que en El Fuerte solamente una reducida superficie puede ser aprovechada. |
| Época de siembra | Fechas de siembra | La época de siembra de este cultivo comprende desde el 1 de octubre hasta el 15 de noviembre, siendo su periodo óptimo del 15 al 20 de octubre. |
| Costos de producción | Desglose de costos en porcentajes | Preparación del terreno 3 %, Siembra 57 %, Fertilización 13 %, Labores culturales 0.5 %, Riegos 2.5 %, Control integral de plagas y enfermedades 10 %, Cosecha 6.5 %, Diversos 7.5 %, costo total del cultivo \$87,837 (2009-2010), (por dicha distribución se reflejan los altos costos de la producción). |

La preparación del terreno define el desarrollo óptimo del cultivo, ya que una buena cama de siembra asegura un alto porcentaje de germinación. A continuación el **Cuadro 16** muestra el manejo que se da al cultivo en la zona norte del Estado.

Cuadro 16. Manejo Agronómico del cultivo de papa en la zona norte del estado de Sinaloa

| Concepto | Descripción |
|-------------------------|--|
| Preparación del terreno | El cultivo requiere preparación completa (barbecho o subsuelo, rastreo, nivelación y marca), además de equipos especiales como rotatil el cual homogeniza el tamaño de las partículas del suelo, |

| Concepto | Descripción |
|-----------------------|---|
| | proporcionando partículas finas. |
| Siembra | Se requiere de maquinaria especial, esta sembradora permite la aplicación de fungicidas al momento de la siembra. La densidad de siembra varía de 4-6 semillas m^{-1} , esto depende directamente de la calidad y tamaño de la semilla, para obtener 44,000 semillas ha^{-1} . |
| Riego | El cultivo no debe presentar déficit de humedad, y el intervalo de riego es corto (12-15 días en riego rodado), ocupando una demanda diaria de 3-4 mm; requiriendo bajo riego superficial de 6-8 riegos, mientras que en riego por aspersión de 10-12, a lo largo de su ciclo. |
| Fertilización | Para una buena fertilización se debe contar con un análisis de laboratorio, requiriendo un adecuado programa de fertilización. |
| Plagas y enfermedades | <p>Plagas:</p> <p>La palomilla de la papa (<i>P. Operculella</i>), es la principal plaga que afecta este cultivo en la zona norte del estado. La hembra pone sus huevecillos (de 40-290) en casi cualquier parte aérea de la planta, al completar su desarrollo la larva se introduce al suelo para pupar sobre los tubérculos dañándolos antes de ser cosechados, por lo cual un riego ligero en esta etapa reduce esta acción.</p> <p>Pulgón verde del melón (<i>Myzus persicae</i> Sulzer) y pulgón verde de la papa (<i>Macrosiphum fabae</i> Thomas), Los adultos alados del pulgón verde del melón son de color verde pálido o brillante con una mancha grande oscura en el dorso del abdomen; Los adultos sin alas son verde pálido o verde brillante. Las formas inmaduras son amarillo pálido, rosa pálido o verde pálido.</p> <p>Enfermedades:</p> <p>El tizón tardío (<i>Phytophthora infestans</i>). Es el principal patógeno de este cultivo, la enfermedad se observa en hojas con manchas color verde pálido, en el tubérculo se aprecian depresiones muy superficiales e irregulares; la cual es favorecida con temperaturas de 12-15 °C y una humedad relativa del 100 %, condiciones en las cuales</p> |

| Concepto | Descripción |
|----------------------|--|
| | <p>es necesario establecer un manejo preventivo.</p> <p>Pudrición seca (<i>Fusarium solani</i>). Afecta tubérculos en almacenaje y semilla después de la siembra. Estos hongos sobreviven en deshechos y viven en el suelo, las temperaturas por encima de los 12 °C favorecen su desarrollo.</p> |
| Cosecha y poscosecha | <p>Se realiza cuando el tubérculo alcanza los 7 cm de diámetro y logra una acumulación de 2250 °D acumulados. Producto que se empaca en arpillas. Para su almacenamiento se debe contar con bodegas refrigeradas manteniendo una temperatura de entre 4-5 °C y baja humedad relativa.</p> |

3.5.2. Determinación de variables de crecimiento

3.5.2.1. Seguimiento fenológico

La evolución del desarrollo de los cultivos se realizó utilizando puntos de referencia en cada una de las parcelas experimentales, determinando, semanalmente, el estado fenológico en el que se encuentra el cultivo.

3.5.2.2. Seguimiento de crecimiento

El seguimiento del crecimiento del cultivo se efectuó quincenalmente mediante muestreos destructivos de 1m² de plantas, elegidas en cada parcela experimental. En cada uno de estos muestreos se ha determinado la biomasa de la planta y sus diferentes órganos. En cosecha se tomaron, por cada parcela experimental, tres muestras de 10 metros lineales de cada una con cinco repeticiones. De cada repetición se determinó la biomasa total, el rendimiento seco y el índice de cosecha (HI).

3.5.3. Programación de riegos

La programación de los riegos se realizó con base al sistema de cómputo IrriModel 1.0 del INIFAP. Este es un sistema computacional para la programación integral y gestión del riego en tiempo real operado a través de Internet. Dicho sistema cuenta con las siguientes capacidades:

- Elaborar planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua y manejo
- Pronosticar el riego con alto nivel de precisión de acuerdo al desarrollo del cultivo determinado por la acumulación de °D.
- Generar y enviar solicitudes de riego al módulo que le presta el servicio de riego

La ventaja de esta herramienta con respecto al método tradicional es que el productor de una manera sencilla aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real que le permite en forma anticipada programar sus riegos. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa ya que es posible mantener niveles óptimos de humedad.

3.6. Validación de parámetros calibrados

Una vez obtenidos los datos de las parcelas de validación, se utilizaron los parámetros conservativos del modelo AquaCrop para fines de simulación del rendimiento de los cultivos de frijol y papa.

Los tratamientos simulados de crecimiento se realizaron generando calendarios de riego bajo las siguientes características hídricas del suelo: 1) Requerimiento neto (el modelo realiza la simulación evitando cualquier tipo de estrés causado por humedad en el suelo; 2) Reducción de lamina de riego (tomándose en cuenta el requerimiento neto sugerido por el modelo, se realiza una reducción a la lamina de riego); 3) Reducción del número de riegos aplicados (tomando en cuenta la misma lamina de riego, se realiza la aplicación de la misma en diferente número de riegos aplicados).

Para cada simulación se tomaron en cuenta las mismas condiciones de manejo agronómico y características de suelo y clima.

Por otra parte se realizaron simulados para diferentes fechas de siembra obteniendo resultados de producción de cosecha y biomasa así como lamina de riego requerida mostrando así la mejor fecha de siembra según el modelo de simulación biológica AquaCrop.

IV. RESULTADOS

4.1. Parámetros obtenidos en campo

4.1.1. Fenología de cultivos.

Se realizó el seguimiento de cultivo con la finalidad de identificar la aparición de las etapas fenológicas tanto para frijol como papa, tomando como base los días después de siembra y °D acumulados.

Se logró identificar la aparición y duración de las etapas para ambos cultivos logrando así obtener °D acumulados necesarios en la planta para presentar cada una de las etapas fenológicas. A continuación se muestran los **Cuadros 17 Y 18** que muestran a detalle la apariencia de la planta al llegar a cada una de las etapas y los valores en días después de siembra y °D acumulados.

Cuadro 17. Monitoreo fenológico del cultivo de frijol

| | | |
|---|---|---|
| <p>Fecha; 29-Noviembre Etapa; germinación 206.55 °D DDS; 18</p>  | <p>Fecha; 4-Diciembre Etapa; desarrollo foliar 267.49 DGC DDS; 25</p>  | <p>Fecha; 17-Diciembre Etapa; floración 374.35 DGC DDS; 36</p>  |
| <p>Fecha; 31-Diciembre Etapa; vaina 491.76 DGC DDS; 50</p>  | <p>Fecha; 14-Enero Etapa; llenado de grano 590.91 DGC DDS; 54</p>  | <p>Fecha; 28-Enero Etapa de maduración 690.56DGC DDS; 64</p>  |

Cuadro 18. Monitoreo fenológico del cultivo de papa.

| | | |
|--|--|--|
| <p>26-Noviembre Etapa; germinación 15 DDS</p> | <p>17-Diciembre Etapa; vegetativo 36 DDS</p>  | <p>31-Enero Etapa; estolonización 50 DDS</p>  |
| <p>18-Enero Etapa; elongación de estolones 63 DDS</p>  | <p>29-Enero Etapa; llenado de tuberculos 79 DDS</p>  | <p>23-febrero Etapa; madurez de tuberculos. 104</p>  |

4.1.2. Producción de biomasa

Tomando en cuenta que la producción de biomasa es un indicador directo del rendimiento, se realizó una serie de muestreos tomando en cuenta las diferentes partes de la planta (raíz, tallo y follaje), con la finalidad de conocer su nivel de desarrollo durante el ciclo vegetativo.

Estos datos ayudaron a identificar momentos como el desarrollo máximo del dosel vegetal y el máximo desarrollo radicular así como identificar el índice de cosecha para cada cultivo. Las **Figuras 10 Y 11** muestran de manera clara el comportamiento de la producción de biomasa de cada una de las partes de la planta.

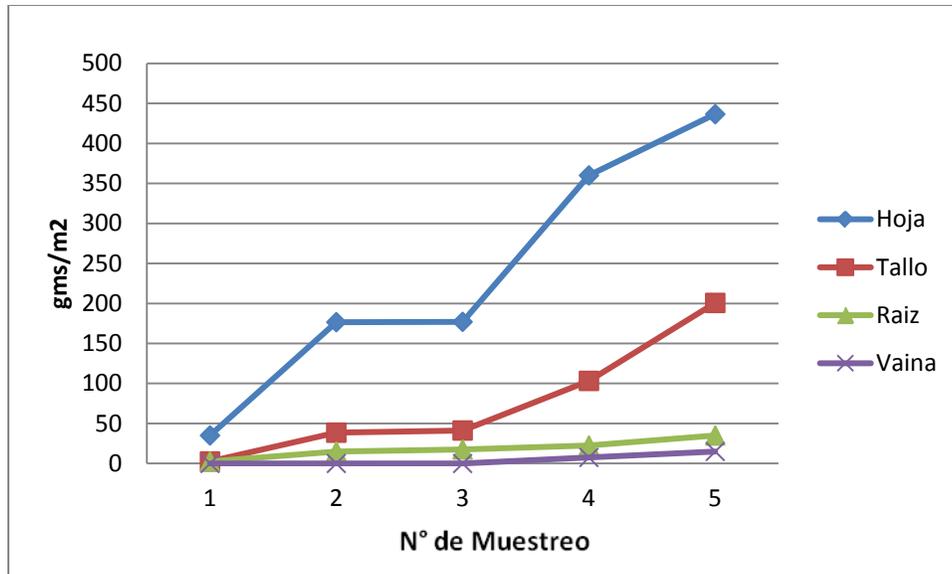


Figura 10. Acumulación de biomasa para el cultivo de frijol

En cuanto a desarrollo radicular, la figura anterior (**Figura 10**) muestra un máximo desarrollo radicular a los 64 DDS, después de esto el crecimiento radicular se mantiene. El alto desarrollo radicular incide directamente a la producción de biomasa (35% grano y 65% paja) la cual muestra un desarrollo exponencial a partir del muestreo numero 3, en la figura se aprecia como el crecimiento del dosel vegetal no se detiene hasta la etapa de senescencia, esto es provocado por un buen manejo del agua de riego ya que inclusive al momento de entrar en etapa de declinación, la planta muestra trifolios en etapa de crecimiento. La formación de vaina (cosecha) coincide directamente con la etapa de mayor producción de biomasa ya que ambas están ligadas de forma directa dependiendo la formación o cantidad de cosecha al volumen de follaje producido por la planta.

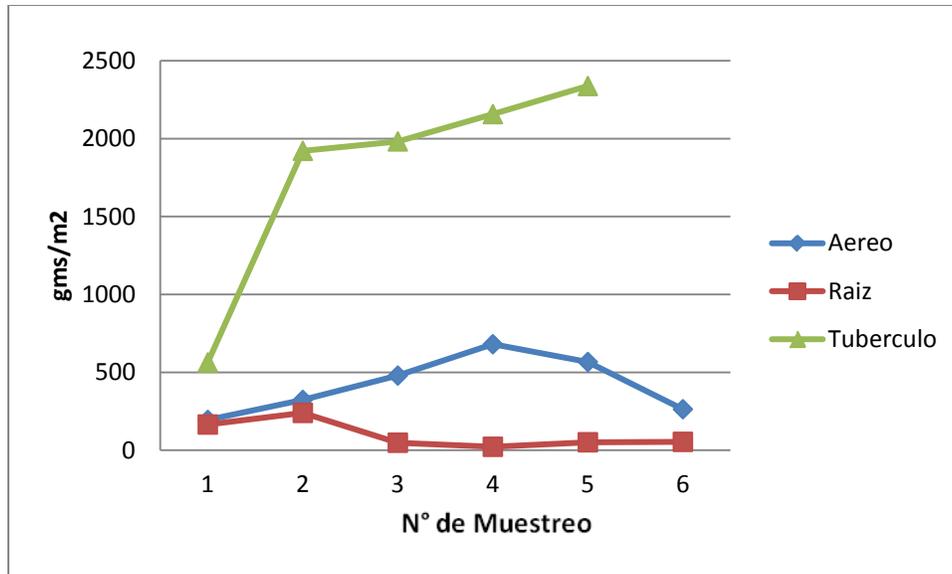


Figura 11. Acumulación de biomasa para el cultivo de papa

Debido a que la papa proveniente de tubérculos, tienen la característica de que al provenir de yemas y no de semillas carecen de radícula, por lo que sus raíces son formadas en la base de cada brote y luego encima de los nudos de la parte subterránea de cada tallo originándose a partir de yemas subterráneas de las cuales se forman raíces a lo largo de los estolones, debido a esto, es el comportamiento de crecimiento radicular que se muestra en la figura anterior (**Figura 11**). Ya que este al llegar a un máximo de crecimiento durante las primeras etapas de desarrollo y hasta el momento que inicia la formación de tubérculos, las raíces presentan un rápido crecimiento a lo largo de los estolones con un sistema radicular semi-fibroso, muy fino, largo y extendido superficialmente pudiendo penetrar hasta los 80 cm de profundidad.

Los tallos que se originan a partir de yemas presentes en la semilla son herbeceos, succulentos y pueden alcanzar alrededor de 0.6 hasta 1 m de longitud, por lo que la formación de follaje acompañado de tallos de gran tamaño, ayudan a la planta a alcanzar su máximo índice de área foliar de manera temprana a lo largo del ciclo del cultivo. Los tallos pueden ser erectos o decumbentes y es normal que se inclinen progresivamente hacia el suelo en la medida que avanza la madurez de los tubérculos y en las etapas finales de desarrollo los tallos puede tornarse relativamente leñosos en

su parte basal, induciendo al cultivo a entrar a la etapa de senescencia lo que ocasiona una disminución en cuanto a la cantidad de área foliar como se muestra en la imagen anterior (**Figura 11**).

De igual forma el **Anexo A** muestra a detalle la tabla de resultados de muestreos realizados para ambos cultivos

4.1.3. Calendarios de riego según el programa IrriModel 1.0

En los siguientes cuadros (**Cuadro 19 y 20**) se detallan los riegos aplicados al cultivo de frijol y papa bajo sistema de riego por goteo y superficial respectivamente, estos fueron estrictamente pronosticados por el sistema IrriModel 1.0, aplicándose en tiempo y forma a lo sugerido.

Cuadro 19. Sumario de riegos aplicados al cultivo de frijol.

| No. | Fecha de riego | Dias riego | Intervalo (días) | Ln (cm) | Lb (cm) | EA |
|-----|----------------|------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| 01 | 24/11/2010 | 10 | 09 | 1.77 | 1.96 | 89.34 |
| 02 | 06/12/2010 | 22 | 12 | 2.06 | 2.18 | 94.65 |
| 03 | 13/12/2010 | 29 | 07 | 2.24 | 2.39 | 93.76 |
| 04 | 19/12/2010 | 35 | 06 | 2.40 | 2.86 | 80.28 |
| 05 | 26/12/2010 | 42 | 07 | 2.31 | 2.74 | 81.19 |
| 06 | 02/01/2011 | 49 | 07 | 2.52 | 2.98 | 81.57 |
| 07 | 09/01/2011 | 56 | 07 | 2.60 | 2.78 | 92.92 |
| 08 | 15/01/2011 | 62 | 06 | 2.31 | 2.42 | 95.00 |
| 09 | 21/01/2011 | 68 | 06 | 2.22 | 2.33 | 95.00 |
| 10 | 26/01/2011 | 73 | 05 | 2.50 | 2.55 | 97.87 |
| 11 | 03/02/2011 | 81 | 08 | 2.50 | 2.62 | 95.00 |
| 12 | 09/02/2011 | 87 | 06 | 2.40 | 2.52 | 95.00 |
| 13 | 13/02/2011 | 91 | 04 | 2.20 | 2.31 | 95.00 |
| 14 | 18/02/2011 | 96 | 05 | 2.30 | 2.41 | 95.00 |
| 15 | 22/02/2011 | 100 | 04 | 2.52 | 2.64 | 95.00 |
| | | | | 35.25 | 37.69 | 91.77 |

Cuadro 20. Sumario de riegos aplicados al cultivo de papa.

| No. | Fecha riego | Días riego | Intervalo (días) | Lamina neta (cm) | Lamina bruta (cm) | Eficiencia (%) |
|--------------|----------------|---------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | 17-12-09 | 36 | 36 | 5.61 | 13.678 | 41.04 |
| 2 | 05-01-10 | 55 | 19 | 5.93 | 9.504 | 62.41 |
| 3 | 19-01-10 | 69 | 14 | 6.10 | 8.640 | 70.57 |
| 4 | 01-02-10 | 82 | 13 | 6.13 | 8.638 | 70.97 |
| 5 | 16-02-10 | 97 | 15 | 6.32 | 8.640 | 73.12 |
| 6 | 01-03-10 | 110 | 13 | 6.30 | 8.638 | 72.94 |
| total | | 110 | 13-36 | 36.39 | 57.74 | 65.17 |

4.2. Parámetros conservativos ajustados

A continuación se muestra el cuadro de parámetros conservativos para los cultivos de frijol y papa, con los cuales se alimentó los datos de entrada del modelo AquaCrop, dichos datos fueron obtenidos en campo mediante diversos muestreos así como también de diferentes autores como lo son las características de las etapas fenológicas. Para el caso de datos no obtenidos en campo el modelo sugiere utilizar los precargados en el modelo **(Anexo E y D)**.

A continuación se muestran los parámetros ya ajustados para la simulación del cultivo de papa **(Cuadro 21)**.

Cuadro 21. Parámetros conservativos del cultivo de papa para condiciones del norte del estado de Sinaloa, basados en (Lima, 17May95).

| Descripción | Valor | Unidad o Medida |
|--|--------------|--|
| Temperatura Base | 2 | °C |
| Temperatura Máxima | 29 | °C |
| Dosel vegetal al 90% emergido (CC ₀) | 6.0 | Cm ² |
| Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC) | 1.78 | Incremento relativo del CC por grado día desarrollo (°D) |
| Máximo dosel vegetal (CC _x) | 95 | % En función de la densidad de la planta |
| Coefficiente del cultivo para transpiración con un dosel vegetal del 100% | 1.10 | Transpiración completa del dosel relativo a ET ₀ |
| Coefficiente de declinación del cultivo antes de CC _x | 1.0% | Declinación por día de las hojas envejecidas |
| Coefficiente de declinación (CGC) hasta senescencia | 0.55% | Decremento del CC relativo a CC _x por °D |
| Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000 | 19.0 | G de (biomasa) m ⁻² en función del CO ₂ atmosférico |
| Umbral del crecimiento de hoja p- alto | 0.20 | Como fracción de agua total disponible (TAW), sobre este el crecimiento de la hoja es inhibido |
| Umbral del crecimiento de hoja p- bajo | 0.55 | El crecimiento de la hoja se detiene en este punto |
| Coefficiente de estrés de crecimiento de la hoja para la formación de la curva | 4.0 | Curva altamente convexa |
| Umbral de conductancia estomatal p-alto | 0.55 | Sobre esto los estomas empiezan a cerrarse |
| Coefficiente de estrés de los | 2.5 | Curva moderadamente convexa |

| | | |
|--|------|---|
| estomas para la formación de la curva | | |
| Coeficiente de estrés de senescencia p-alto | 0.55 | Sobre este valor la senescencia se acelera |
| Coeficiente de estrés de senescencia para la formación de la curva | 2.5 | Curva moderadamente convexa |
| Índice de cosecha Hi como referencia | 87% | Valor normal para este cultivo |
| °D desde el 90% de emergencia al inicio de la antesis | 713 | Puede variar según la variedad |
| Duración de la antesis en °D | 190 | |
| Coeficiente de inhibición de crecimiento con respecto al Hi | 10.0 | Hi aumentado por inhibición del crecimiento de las hojas de las antesis |
| Coeficiente de inhibición de los estomas con respecto al Hi | 5.0 | Hi reducido por inhibición de los estomas en la antesis |
| °D totales desde emergencia a maduración | 2237 | Puede variar un poco según la variedad del cultivo. |

Para el cultivo de frijol, el modelo AquaCrop no cuenta con datos precargado, utilizándose los correspondientes al cultivo de soja ya que cuenta con características muy similares de producción, manejo y genéticas.

A continuación se muestran los parámetros ajustados (**Cuadro 22**) para el cultivo de frijol.

Cuadro 22. Parámetros conservativos del cultivo de frijol para condiciones del norte del estado de Sinaloa, basados en (Patancheru, 25 junio 96).

| Descripción | Valor | Unidad o Medida |
|---|-------|--|
| Temperatura Base | 8 | °C |
| Temperatura Máxima | 23 | °C |
| Dosel vegetal al 90% emergido (CC ₀) | 5.0 | Cm ² |
| Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) | 1.42 | Incremento relativo del CC por grado día desarrollo (°D) |
| Máximo dosel vegetal (CC _x) | 90 | % En función de la densidad de la planta |
| Coeficiente del cultivo para transpiración con un dosel vegetal del 100% | 1.10 | Transpiración completa del dosel relativo a ET0 |
| Coeficiente de declinación del cultivo antes de CC _x | 1.0% | Declinación por día de las hojas envejecidas |
| Coeficiente de declinación (CGC) hasta senescencia | 0.7% | Decremento del CC relativo a CC _x por °D |
| Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000 | 17.0 | G de (biomasa) m ⁻² en función del CO ₂ atmosférico |
| Umbral del crecimiento de hoja p-alto | 0.15 | Como fracción de agua total disponible (TAW), sobre este el crecimiento de la hoja es inhibido |
| Umbral del crecimiento de hoja p-bajo | 0.65 | El crecimiento de la hoja se detiene en este punto |
| Coeficiente de estrés de crecimiento de la hoja para la formación de la curva | 3.0 | Curva altamente convexa |
| Umbral de conductancia estomatal p-alto | 0.50 | Sobre esto los estomas empiezan a cerrarse |
| Coeficiente de estrés de los estomas para la formación de la curva | 3.0 | Curva moderadamente convexa |
| Coeficiente de estrés de senescencia p-alto | 0.7 | Sobre este valor la senescencia se acelera |
| Coeficiente de estrés de senescencia para la formación de la curva | 3 | Curva moderadamente convexa |
| índice de cosecha Hi como referencia | 35% | Valor normal para este cultivo |
| °D desde el 90% de emergencia al inicio de la antesis | 504 | Puede variar según la variedad |
| Duración de la antesis en °D | 1232 | |
| Coeficiente de inhibición de | 10.0 | Hi aumentado por inhibición del |

| | | |
|--|------|---|
| crecimiento con respecto al Hi | | crecimiento de las hojas de las antesis |
| Coefficiente de inhibición de los estomas con respecto al Hi | 5.0 | Hi reducido por inhibición de los estomas en la antesis |
| °D totales desde emergencia a maduración | 1235 | Puede variar un poco según la variedad del cultivo. |

4.3. Resultados de la validación del modelo para frijol y papa

Ya calibrados los parámetros, se inició con la validación del modelo AquaCrop al simular el experimento de Sifuentes *et. al.*, (2009) y obtener los resultados que se presentan en el **Cuadro 23**.

Cuadro 23. Datos obtenidos del experimento vs validación en AquaCrop para el cultivo de papa

| Datos | Experimento | Validación modelo AquaCrop |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Fecha de Siembra | 11-nov-2009 | 11-nov-2009 |
| Densidad (plantas ha ⁻¹) | 44,000 | 44,000 |
| Textura | Arcillosa | Arcillosa |
| Fertilización | NPK 245-30-350h ⁻¹ | Sin estrés |
| Temperatura humbral °C | 2-29 | 2-29 |
| Días a madurez | 122 | 121 |
| °D a madurez | 2111 | 2100 |
| Lamina neta (mm) | 363 | 363 |
| Lamina Bruta | 575 | 575 |
| Biomasa (ton ha ⁻¹) | 12,794 | 13,072 |
| Rendimiento (ton ha ⁻¹) | 35,006 | 35,766 |

Cuadro24. Datos obtenidos del experimento vs validación en AquaCrop para el cultivo de frijol

| DATOS | EXPERIMENTO | VALIDACION MODELO ACUA CROP |
|---|-------------------------------------|--|
| Fecha de Siembra | 15-nov-2009 | 15-nov-2009 |
| Densidad (plantas ha ⁻¹) | 175,000 | 175,000 |
| Textura | Arcillosa | Arcillosa |
| Fertilización | NPK 222-48-269kg h ⁻¹ | Sin estrés de fertilidad |
| Temperatura humbral °C | 8-23 | 8-23 |
| Días a madurez | 128 | 127 |
| °D a madurez | 1235 | 1227 |
| Lamina neta (mm) | 347 | 347 |
| Lamina Bruta (mm) | 371 | 371 |
| Biomasa (ton ha ⁻¹) | 9,145 | 9,105 |
| Rendimiento (ton ha ⁻¹) | 3.2 | 3.18 |

4.4. Aplicaciones del modelo

Tomando en cuenta los datos de validación agronómicos, se realizaron simulaciones bajo diferentes disponibilidades de agua en el suelo para obtener los rendimientos y laminas de agua aplicadas para ambos casos (frijol y papa) con respecto a fechas de siembra, estrés hídrico y manejo del riego con un clima promedio del DR-075.

4.4.1. Riego bajo condiciones óptimas de humedad

Una vez realizada la validación de parámetros, se realizó una simulación en la cual se le indicó al modelo mantener el cultivo bajo condiciones de humedad óptima, con la

finalidad de obtener los resultados potenciales si el cultivo no presentara estrés hídrico en ninguna de sus etapas fenológicas.

La simulación realizada sin restricción de humedad al cultivo de papa (**Cuadro 25**), obtuvo rendimientos superiores a los encontrados en la validación, lo que sugiere una baja eficiencia en el manejo del riego (superficial por surcos) ya que los datos obtenidos de forma experimental mostraban un manejo del riego con eficiencias no mayores al 65%. Cabe mencionar que el modelo de simulación al proporcionar condiciones de humedad óptima simula condiciones semejantes a las proporcionadas por un riego por goteo.

Cuadro 25. Simulación realizada al cultivo de papa sin estrés hídrico.

| DATOS | Simulación (sin estrés hídrico) |
|--------------------------------------|--|
| Fecha de Siembra | 11-nov-2009 |
| Densidad (plantas ha ⁻¹) | 44,000 |
| Textura | Arcillosa |
| Fertilización | Sin estrés |
| Temperatura humbral °C | 2-29 |
| Días a madurez | 121 |
| °D a madurez | 2100 |
| Lamina neta (mm) | 379 |
| Lamina Bruta (mm) | 542 |
| Biomasa (ton ha ⁻¹) | 14,345 |
| Rendimiento (ton ha ⁻¹) | 39,249 |

En el caso del frijol (**Cuadro 26**), es importante mencionar que el método de riego utilizado en la parcela experimental fue de goteo por lo que la simulación realizada sin restricción de humedad obtuvo resultados prácticamente idénticos ya que la eficiencia en aplicación obtenida en este tipo de métodos de riego son superiores al 90% por lo que al realizar la simulación el cultivo no presentó ningún tipo de estrés hídrico.

Cuadro 26. Simulación realizada al cultivo de frijol sin estrés hídrico.

| DATOS | Simulación (sin estrés hídrico) |
|--------------------------------------|--|
| Fecha de Siembra | 15-nov-2009 |
| Densidad (plantas ha ⁻¹) | 175,000 |
| Textura | Arcillosa |
| Fertilización | Sin estrés de fertilidad |
| Temperatura umbral °C | 8-23 |
| Días a madurez | 127 |
| °D a madurez | 1227 |
| Lamina neta (mm) | 425 |
| Lamina Bruta (mm) | 425 |
| Biomasa (ton ha ⁻¹) | 9,451 |
| Rendimiento (ton ha ⁻¹) | 3.32 |

4.4.2. Estrés hídrico controlado y reducción del número de riegos

Con la validación del cultivo realizada y la simulación sin estrés hídrico mostrando el potencial productivo para las características del experimento, con la finalidad de conocer el comportamiento del ciclo de cultivo y la producción de cosecha y biomasa, se procedió a realizar una serie de simulaciones en las que se le indicó al modelo aplicar un porcentaje de lamina de riego diferente al requerimiento neto. Para el caso del cultivo de papa, se disminuyó la lámina neta requerida en un 47% con respecto a la simulación bajo condiciones óptimas. Se realizaron dos simulaciones en las cuales se maneja diferente número de riegos, en ambas el modelo indicó el momento de riego buscando reducir el menor porcentaje posible de la producción de cosecha. A continuación se muestran los **Cuadros 27 Y 28** con los calendarios de riego sugeridos.

Cuadro 27. Reducción de lámina de riego con aplicación de 4 riegos complementarios.

| Riego de auxilio | Lamina neta (mm ³) | DDS | °D | Etapas |
|------------------|--------------------------------|-----|------|--------|
| 1 | 40 | 40 | 680 | |
| 2 | 40 | 65 | 1200 | |
| 3 | 65 | 80 | 1500 | |
| 4 | 80 | 110 | 1980 | |
| Total | 225 | | | |

Rendimiento= 25.55 ton ha⁻¹

Cuadro 28. Reducción de lámina de riego con aplicación de 3 riegos complementarios.

| Riego de auxilio | Lamina neta mm ³ | DDS | °D | Etapas |
|------------------|-----------------------------|-----|------|--------|
| 1 | 60 | 45 | 810 | |
| 2 | 80 | 80 | 1500 | |
| 3 | 85 | 110 | 1980 | |
| Total | 225 | | | |

Rendimiento= 21.69 ton ha⁻¹

El cultivo de papa es de alta sensibilidad a excesos y déficit de humedad y consideración que el manejo de agua de riego para la zona de estudio es por número de riegos y no por volumen, se optó por realizar simulaciones que redujeran en primera instancia el volumen de agua pero de igual forma el número de riegos aplicados. Se ve claramente como en ambas simulaciones, el rendimiento baja considerablemente y a pesar de ser la misma lamina, la simulación con menor número de riegos muestra un rendimiento más bajo. De tal manera que el manejo del riego para el cultivo de papa no depende directamente de la lamina total de agua si no del numero de riegos aplicados ya que el cultivo responde mejor a la aplicación de laminas pequeñas en mayor número de riegos a intervalos cortos de tiempo entre cada una de ellos, debiendo proporcionar de forma constante humedad suficiente al suelo considerando las etapas críticas del cultivo.

Para la validación realizada al cultivo de frijol, el manejo del riego se dio bajo sistema por goteo, y tomando en cuenta que solo un 5% del total de la superficie establecida en la zona norte del estado emplea este sistema, se optó por realizar una simulación bajo manejo de riego superficial, debido a que la mayor parte de la superficie establecida se desarrolla bajo este sistema de riego. A continuación se muestran los resultados (**Cuadro 29 Y 30**) obtenidos por el modelo con una reducción del 50% de lámina requerida con respecto al requerimiento neto, bajo las mismas condiciones a las encontradas en la validación solo diferenciado por el sistema de riego empleado.

Cuadro 29. Simulación bajo riego por gravedad (2 riegos complementarios).

| Riego de auxilio | Lamina neta (mm ³) | DDS | °D | Etapas |
|------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------|
| 1 | 129 | 33 | 453 | Prefloración |
| 2 | 90 | 61 | 724 | Llenado del fruto |
| Total | 219 | | | |

*Biomasa total; 8.07 ton ha⁻¹
Cosecha; 2.81 ton ha⁻¹*

La simulación realizada bajo riego por gravedad aplicando 2 riegos de auxilio (**Cuadro 29**) es un claro ejemplo del manejo empleado en la zona de estudio ya que coincide con lo encontrado a nivel de campo. Los productores aplican un primer riego de auxilio durante la etapa de prefloración con la finalidad de lograr una máxima producción de flores y un buen desarrollo del dosel vegetal ya que este influirá de forma directa en la producción. El segundo riego de auxilio es aplicado durante la etapa en la que se presenta la mayor formación de cosecha y el llenado del fruto, el volumen de agua aplicada en el segundo riego es inferior al primero debido a que el cultivo se encuentra en el máximo desarrollo del dosel vegetal lo que impide la pérdida de humedad por evaporación, con esto también se busca evitar el desarrollo de enfermedades fungosas causadas por exceso de humedad.

La simulación anterior muestra la forma en que comúnmente los agricultores manejan la aplicación de los riegos bajo sistema superficial, por lo que se realizó una simulación en la que se reduce a uno el número de riegos aplicados con la finalidad de simular condiciones de restricción de agua obteniendo los siguientes resultados (**Cuadro 30**).

Cuadro 30. Simulación bajo riego por gravedad (1 riego complementario).

| Riego de auxilio | Lamina neta (mm ³) | DDS | °D | Etapas |
|------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------|
| 1 | 75 | 70 | 610 | Llenado del fruto |
| Total | 75 | | | |

Biomasa total; 3.6 ton ha⁻¹
Cosecha; 1.2 ton ha⁻¹

La posibilidad de reducir a solamente un riego de auxilio la producción de frijol restringe de manera importante la producción de cosecha ya que según el modelo este debería aplicarse entre la etapa de formación de vaina y llenado del fruto, sacrificando etapas como la de desarrollo vegetativo e inicio de floración. La caída en producción de cosecha es de casi un 60% con respecto al manejo tradicional bajo riego por gravedad.

4.4.3. Análisis de productividad del agua

En la siguiente figura (**Figura 12**) se puede observar el comportamiento del rendimiento (kg/cm de lamina aplicada) en función de la cantidad de lamina de agua aplicada (cm) (PW), los datos obtenidos a nivel experimental son prácticamente iguales a los resultados de la calibración realizada al modelo AquaCrop lo que sugiere una buena calibración. De igual forma se realizó una simulación en la que se le indica al modelo aplicar el requerimiento neto por el cultivo evitando así cualquier tipo de estrés hídrico. La simulación arrojó datos inferiores en PW debido al aumento en lámina de agua requerida aplicada necesaria para elevar el rendimiento.

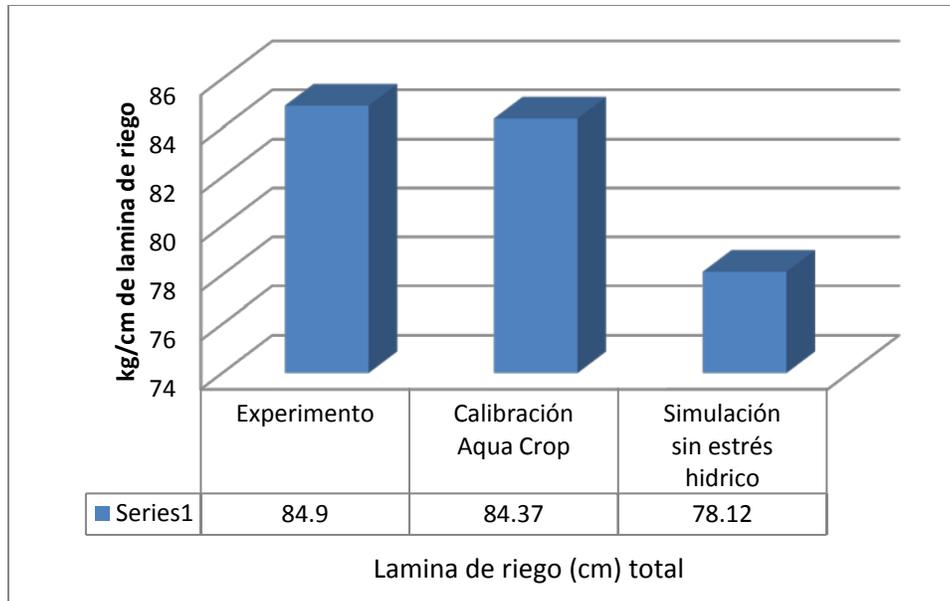


Figura 12. Productividad del agua obtenida en el cultivo de frijol.

El aumento en lamina neta requerida para la simulación genero un aumento considerable en rendimiento para la simulación realizada sin estrés hídrico (**Figura 13**) incrementándolo 120 kg ha^{-1} en comparación con lo obtenido a nivel experimental valor. El incremento obtenido no podría considerarse de importancia en primera instancia, pero si se toma en cuenta el potencial productivo en variedades de azufrado higuera para la zona norte del estado de Sinaloa (3.2 ton ha^{-1} a 3.4 ton ha^{-1}), se consideraría que la producción se encuentra en el tope de potencial productivo de la variedad.

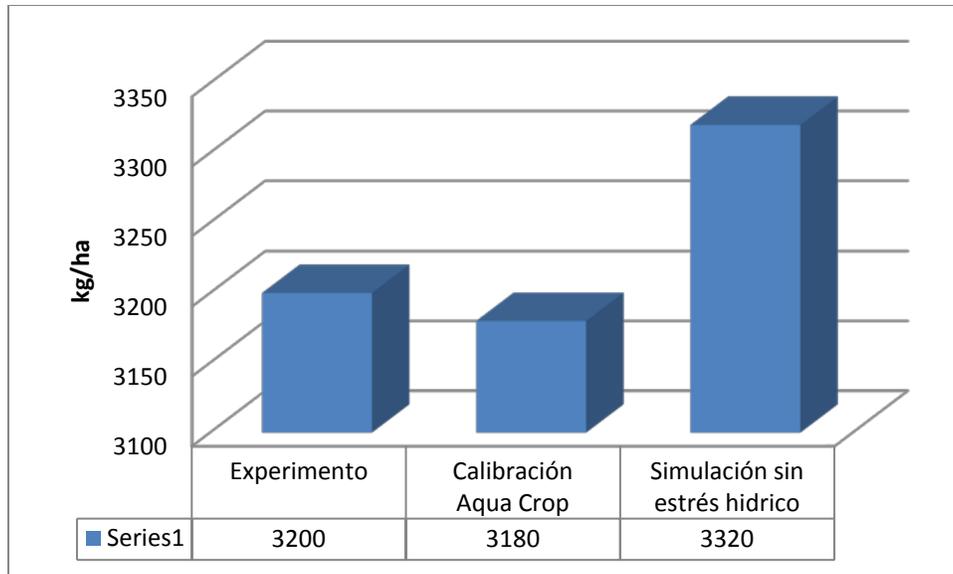


Figura 13. Rendimiento obtenido en el cultivo de frijol

Lo anterior muestra resultados que simulan rendimientos que se encuentran en el tope de la producción de la variedad, por lo que tanto en la calibración como simulación los resultados no varían mucho debido a que los datos obtenidos en campo fueron manejados con eficiencias de riego muy altas (riego por goteo). Esto significa que el margen de aumento en rendimiento es poco y es necesario aumentar de forma considerable la lámina de riego (**Figura 14**) que aumentarían muy poco los valores de rendimiento.

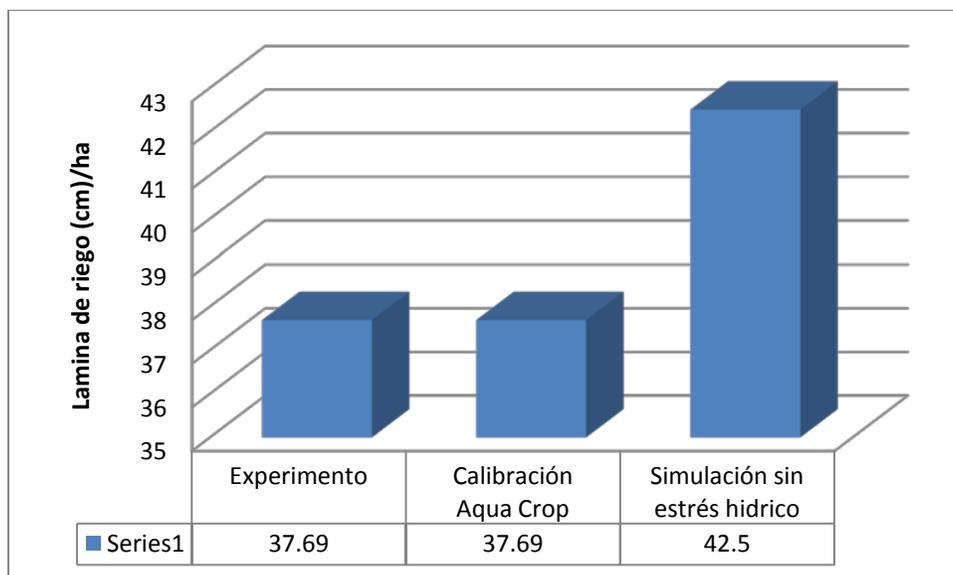


Figura 14. Lámina de agua aplicada al cultivo de frijol

Para el caso del cultivo de papa (**Figura 15**), ya realizada la calibración, los resultados obtenidos indican una mayor PW para la simulación sin estrés hídrico ya que a pesar de aumentar la lamina requerida (**Figura 16**) el rendimiento aumenta considerablemente compensando así los valores de PW.

Se aprecia como la aplicación oportuna del agua de riego para el cultivo de papa es sumamente importante evidenciando que para alcanzar un potencial de rendimiento no debe haber stress hídrico por exceso o déficit de humedad.

Un riego aplicado un día antes o después podía dañar el cultivo así como una deficiencia en etapas críticas desencadena un desequilibrio metabólico en las funciones de la planta lo cual lleva a reducir el potencial productivo.

La predicción de la demanda hídrica del cultivo de papa es de gran importancia para los productores, sirve como referencia para conocer con anticipación la cantidad de agua y la etapa en donde el cultivo requiere mayor o menor cantidad para su crecimiento y desarrollo, y así lograr una mejor calidad de tubérculos y mayor producción de cosecha.

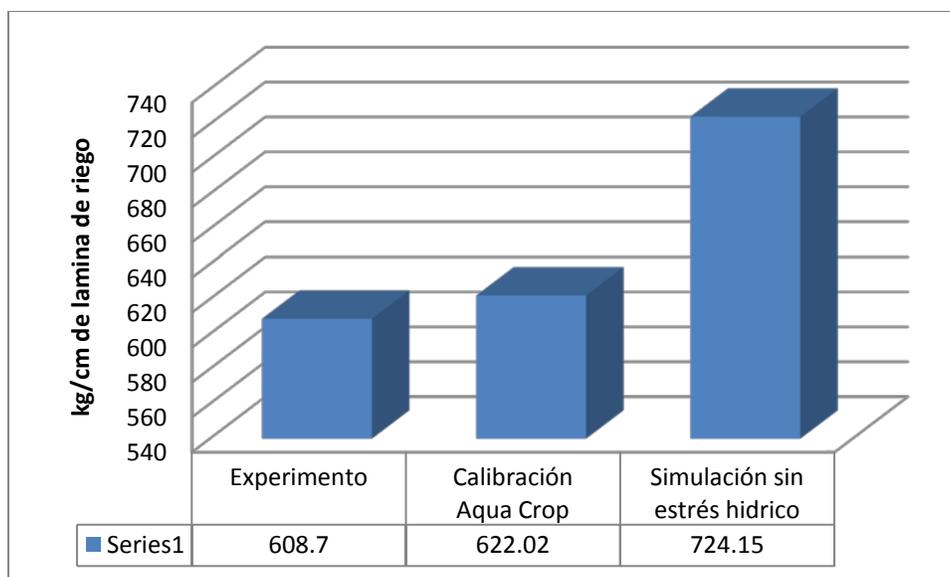


Figura 15. Productividad del agua PW en el cultivo de papa.

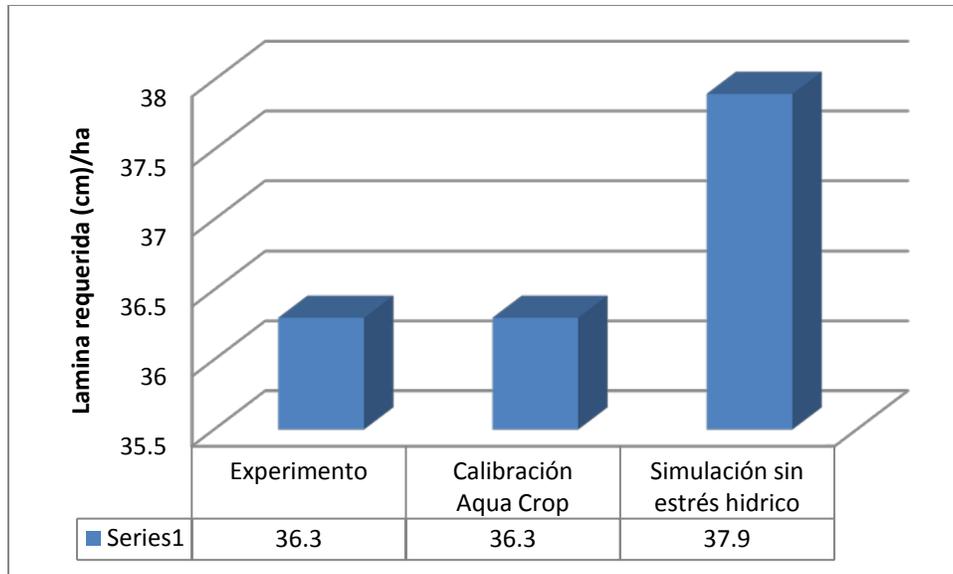


Figura 16. Lámina neta requerida por la planta.

Al analizar los datos de rendimiento (**Figura 17**) y tomando en cuenta lo mostrado por los datos de productividad de agua, se aprecia como el rendimiento se eleva de forma considerable al aumentar la lamina de agua aplicada al cultivo ya que según el modelo al simular sin estrés hídrico indica un requerimiento neto superior al aplicado a nivel experimental. En cuanto a los datos experimentales cotejados contra la calibración del modelo, se encuentra que son muy similares por lo que se considera que los ajustes realizados al modelo son los correctos.

Cabe mencionar que los resultados de rendimiento arrojados por la simulación sin estrés hídrico concuerdan con los obtenidos en la zona norte del estado de Sinaloa, lugar donde se desarrollo el experimento.

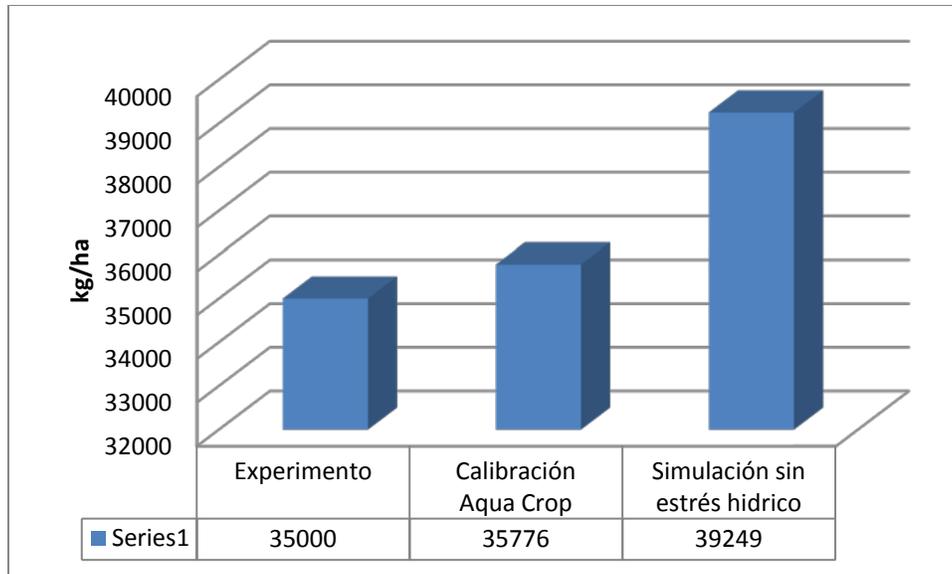


Figura 17. Rendimiento obtenido para el cultivo de papa.

Los datos de lamina bruta (**Figura 18**) señalan rangos menores para el ejemplo de simulación sin estrés a pesar de mencionar en la **figura 16** un mayor requerimiento neto, esto significa que a pesar de ser mayor la lamina requerida con respecto a los datos experimentales el total de agua aplicada fue menor ya que la eficiencia de aplicación utilizada por el modelo varía en pequeña proporción con respecto a la utilizada de forma experimental.

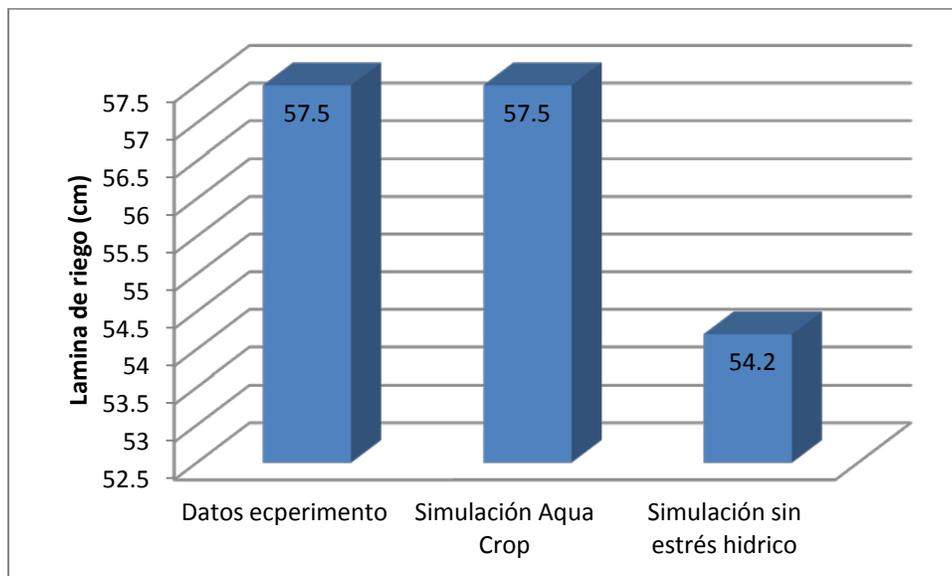


Figura 18. Lamina bruta aplicada al cultivo de papa

4.4.4. Rendimientos simulados para diferentes fechas de siembra

Con la finalidad de conocer el rendimiento y necesidades hídricas del cultivo según la fecha de siembra y tomando en cuenta el ciclo de siembra actual, se realizó una serie de simulaciones buscando encontrar la fecha en la cual el cultivo presentaba el mejor rendimiento. A continuación se presentan los resultados (**Figura 19**) encontrados para el cultivo de frijol para condiciones de riego por goteo y riego superficial.

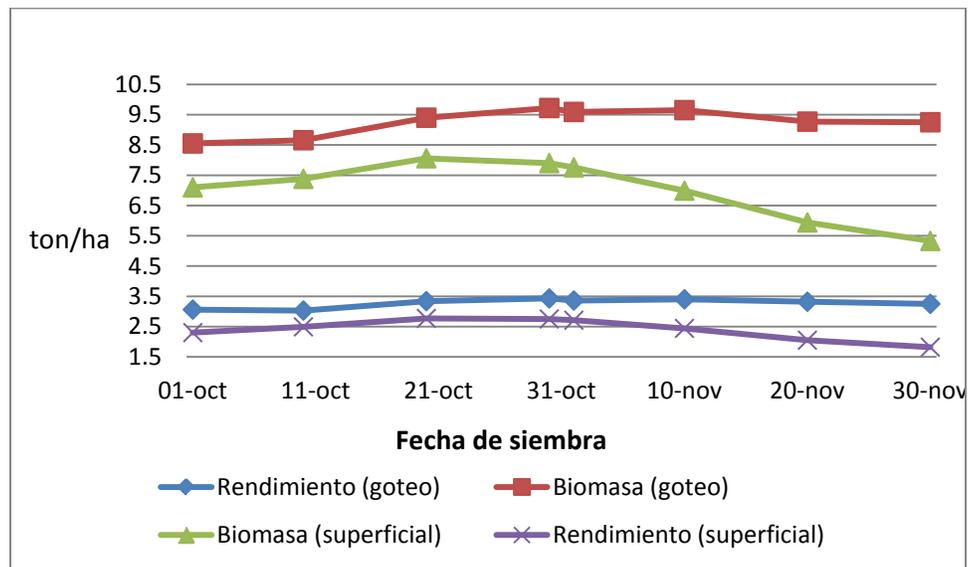


Figura 19. Comparación de rendimiento de biomasa y cosecha para simulaciones bajo riego por goteo y superficial para frijol.

La simulación realizada en condiciones de riego por goteo muestra un comportamiento estable aun cuando se varía la fecha de siembra ya que tanto para biomasa como rendimiento no se encuentra mayor diferencia si el cultivo se estableciera en un ciclo de siembra que comprenda los meses de octubre y noviembre. La cantidad de agua requerida en el cultivo si muestra variación debido a que según la fecha establecida serán las condiciones climáticas que se presentaran, las siembras más tardías requieren mayor cantidad de agua debido a que al desfasarse enfrentaran condiciones más cálidas de la parte media hacia el final de su ciclo.

El manejo del agua para el cultivo de frijol bajo riego por goteo puede ser considerada como una alternativa viable tomando en consideración un ciclo de siembra de dos meses (octubre y noviembre) ya que la posible pérdida de rendimiento a causa de la

variación del clima es disminuida por el manejo eficiente del riego que proporciona el sistema de riego por goteo.

En contraste al analizar el comportamiento del frijol bajo condiciones de riego superficial, se aprecia cómo influye la baja eficiencia en la aplicación del riego que impide la obtención de rendimiento por encima de 2.7 ton ha^{-1} . El manejo del agua bajo método superficial impide una aplicación homogénea de humedad al cultivo por lo que se aprecian grandes variaciones con respecto a fechas de siembra temprana o tardía ya que no se logra mitigar los efectos del clima como lo es en el caso del riego por goteo. En resumen y después de analizar las simulaciones realizadas, se deduce como el eficientar la aplicación del agua de riego ayuda en la obtención de mejores resultados así como considerar rangos de ciclo de siembra más amplios sin sacrificar el rendimiento aunado esto a la disminución considerable del uso del agua.

Para el caso de comparación de fechas de siembra en el cultivo de papa (**Figura 20**), el comportamiento es similar al cultivo de frijol ya que para ambos casos (goteo y superficial) coinciden en una fecha óptima de siembra. Se encontró un comportamiento similar en producción de biomasa para los dos ejemplos, se encontró mayor diferencia en producción de tubérculo debido a que la parte considerada como cosecha (tubérculo) se encuentra en contacto directo con el suelo pudiendo encontrar mejores condiciones de desarrollo en circunstancias que no generen estrés hídrico como las proporcionadas por un sistema de riego por goteo.

Ambos cultivos se vieron beneficiados al emplear un sistema de riego que proporcione condiciones de humedad óptimas, ya que la respuesta al exceso o déficit de humedad para ambos casos repercuten directamente en la obtención de buenos rendimientos.

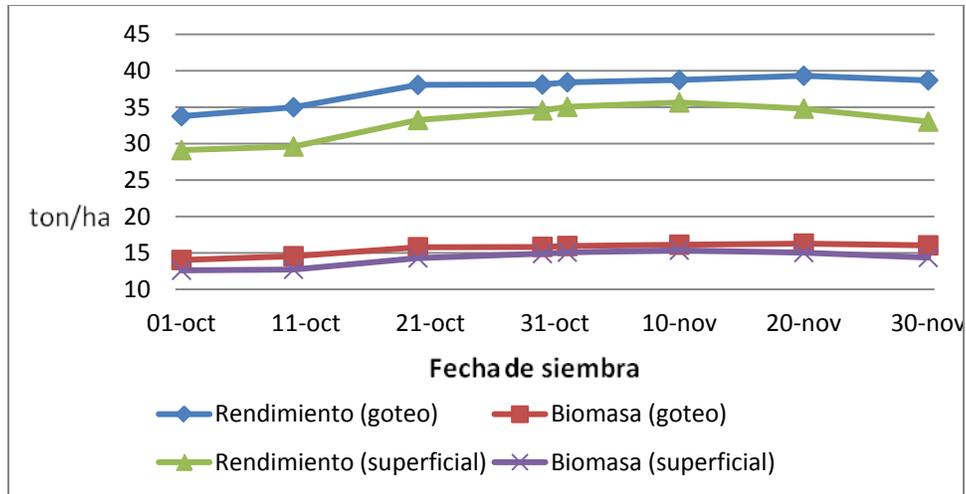


Figura 20. Comparación de rendimiento de biomasa y cosecha para simulaciones bajo riego por goteo y superficial para papa.

V. CONCLUSIONES

El modelo AquaCrop ha mostrado ser una excelente herramienta de apoyo para la toma de decisiones a nivel parcelario al poder simular con buena confiabilidad el rendimiento del frijol y papa bajo diferentes condiciones de manejo del riego y climáticas, las cuales son características que se presentan en los distritos de riego del norte de Sinaloa.

La ventaja del modelo al simular el requerimiento hídrico es que se pueden obtener dichos requerimientos para diferentes fechas de siembra y así elegir la más adecuada para establecer el cultivo. Además, tiene la capacidad de realizar el cálculo considerando las siguientes cuestiones: suelo desnudo (calcula la evaporación del suelo y evapotranspiración de la planta) y suelo cubierto (calcula la evapotranspiración de la planta sin evaporación del suelo).

La calendarización del riego, la simulación de crecimiento y el pronóstico del rendimiento son algunas de las ventajas del AquaCrop como herramienta de planeación y seguimiento de un ciclo agrícola para la toma de decisiones, al reducir el tiempo y recursos necesarios para analizar diferentes alternativas de manejo del cultivo.

Según los resultados obtenidos en las simulaciones, el cultivo de frijol presenta una fecha óptima de siembra que comprende del 15 al 30 de octubre para cultivos bajo sistema de riego superficial y del 15 de octubre al 20 de noviembre para los establecidos bajo sistema de riego por goteo, este último comprende un ciclo de siembra más amplio ya que el mismo ayuda a aminorar los efectos negativos causados por el clima proporcionando un nivel de humedad óptimo al cultivo. Para la papa, la fecha sugerida comprende del 30 de octubre al 15 de noviembre bajo sistema de riego superficial y del 25 de octubre al 25 de noviembre para sistemas de riego por goteo. Lo anterior, muestra lo realizado a nivel de campo por los productores en la actualidad para la zona estudiada lo cual genera una alta fiabilidad de las simulaciones realizadas con los parámetros conservativos.

Con base a lo anterior, se recomienda aplicar esta tecnología a otras regiones productoras del estado y del país con la finalidad de brindar al productor una herramienta confiable que permita ayudar a la toma de decisiones, como lo son el manejo agronómico en general de cultivos.

VI. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., F. N. Gichuki; C. C. Rosenzweig. 1991.** CO₂-induced climatic changes and irrigation-water requirements. *J. Water Res. Plann Mgmt.* 117:157-178.
- Alonso, A.F. 2002.** El cultivo de la patata. 2^{da} Edición. Editorial Mundí-Prensa. Barcelona. 494 pp.
- Arnold, C.Y. 1959.** The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 74:430–445.
- Barbosa, F. A. ; Graca, D. S. ; Guimaraes, P. H. S. ; Silva Junior, F. V., 2008.** Economic analysis of protein and energy supplementation of steers during the transition period between the rainy and dry seasons. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.*, 60 (4): 911-916
- Barreiro,** <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/057/ca057.pdf>
- Bertalanffy, L. V. VON 1968.** "General Systems Theory". *New York: George Braziller.*
- Bolaños G. M., E. Palacios V., C. Scott y A. Exebio G. 2001.** Estimación del volumen de agua usando una zona de riego mediante una imagen de satélite e información complementaria. *Agrociencia* 35 (6): 589-597.
- Bosnjak, D. Y Pejic, B. 1996.** Potatoes water requirement in the Chernozem zone of Yugoslavia. *Acta Horticulturae*, 1(449):211 – 215.
- Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P., Faci, J.M., 2000.** Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal.* 92, 679-690.

- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983.** Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. Guía de estudio para ser usada como complemento de la Unidad Auditorial sobre el mismo tema. Contenido Científico: Fernández, Fernando; Gepts, Paúl; López Marceliano. Cali Colombia. CIAT. Pp. 6-12.
- CICC (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático). 2007.**Estrategia nacional de cambio climático. México, D. F.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2008.** Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año agrícola 2007/08. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. P. 297.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua 2004.** Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, Tlalpan, México, D.F. 389 P.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua 2009.** Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, Tlalpan, México, D.F. 389 P.
- Cruz-León, J. M. y J. Bielsa-Callau. 2001.** Sobre la eficiencia, el uso sostenible del recurso del agua y la gestión del territorio. Ager. Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural 1: 85-112
- De Wit, C. T. (1993).** Philosophy and terminology. In *On Systems Analysis and Simulation of Ecological Processes with Examples in CSMP and FORTRAN*(pp. 3-9). Springer Netherlands.
- De Wit, C. T. (1982).** Simulation of living systems. *Simulation of plant growth and crop production/FWT Penning de Vries and HH van Laar, editors.*

- Doorembos, J.; Kassam, A. 1979.** Yield response to water. Irrigation and Drainage. Roma, Italia. FAO, Food and Agriculture Organization of United Nations. P 193.
- Dufault, R.J. 1997.** Determining heat unit requirements for broccoli harvest in coastal South Carolina. *J. Amer. Soc. Hort. Scr.* 122: 169-174
- Ekanayake, I. 1994.** Estudios sobre estrés por sequía y necesidades de riego en la papa. Guía de Investigación CIP 30. Lima, Perú. Centro Internacional de la Papa. pp 40.
- Ellis, R. H., P. Hadley, E. H. Roberts, and R. J. Summerfield. 1990.** Quantitative relations between temperature and crop development and growth. *In:* Jackson, M. T., B. V. Ford-Lloyd, and M. L. Parry (eds). Climatic Change and Plant Genetics Resources. Belhaven Press, London, pp: 85–115.
- Flores, G.H. 2007.** Validación de un modelo basado en el concepto grados día (°D) para el pronóstico de riego en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum L.*) en el norte de Sinaloa. Tesis de Licenciatura. UAS-ESAVF. Juan José Ríos, Sinaloa.
- Fox, D., G., (1981)** Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on Dispersion Model Performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 62, 599-609.
- García-Vila, M., Fereres, E. 2012.** Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, 36: 21-31
- González C. J., B. Muñoz H., R. Acosta. H. y J. C. Mailhol. 2006.** Modelo de la onda cinemática adaptado a riego por surcos cerrados. *Agrociencia* 40 (6): 731-740.

- Goyal, R. K. 2004.** Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case of study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric. Water Manage.* 69: 1–11.
- Gustavo A. Enríquez. 1977.** Mejoramiento Genético sobre otros Factores Limitantes de la producción de frijol, diferentes enfermedades e insectos. Turrialba, Costa Rica. Pp 50.
- Haverkort, A. J. 1986.** Yield levels of potato crops in central Africa. *Agric. Systems* 21: 227-235.
- 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.
- 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, 448-459.
- Instituto nacional de estadística y geografía. 2005.** Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:250,000. CEA Jalisco. Sistema Estatal de Información del Agua
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007.** Cambio climático 2007: Informe de síntesis. *In:* Pachauri, R.K., and A. Reisinger (eds). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC. Ginebra, pp: 104
- Jefferies, R. A. y Lawson, H. M. 1991.** A key the stages of development of potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology.* 119:387-389.

- Jerez, J.; Simpfendörfer, C. 2000.** Efecto del riego en cultivos de papa. Tierra Adentro. Especial riego y drenaje. INIA Instituto de Investigaciones Agropecuarias (34):36–38.
- Jones, C. A. and Kiniry, J. R. 1986.** CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, TX
- Jones, J. W., & Luyten, J. C. 1998.** Simulation of biological processes. *Agricultural systems modeling and simulation*, 19-62.
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., ... & Smith, C. J. (2003).** An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 267-288.
- Klassen, G.; Mills, G. Y Geisel B. 2001.** Potato Production. Irrigation. [en línea]: documento electrónico fuente en internet [fecha de consulta: 05 enero 2004]. Disponible en: <http://www.gov.mb.ca/agriculture/crops/potatoes/bda01s11.html>
- Krause P, Boyle DP, B'ase, F. 2005.** Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5: 89–97.
- Lafta, M. A.; and Lorenze, H. J. 1995.** Effect of high temperature on plant Growth and carbohydrate metabolism in potato. *Plan physiology*. 109(2):637-643.
- Lallukka U., Rantanen O. and Mukula J. 1978.** The temperature sum requeriments of barley varieties in finland. *Ann. Agric. Fenn.* 17: 185-191. *et al.*, 1978
- Lang, A. 1952.** Physiology of flowering. *Annual Review of plant Physiology*. 3:265-306.

- Lawlor, D.W. 2005.** Plant responses to climate change: impacts and adaptation. In K. Omasa, I. Nouchi, y L. J. De Kok. (eds). Plant responses, to air pollution and global change. Springer-Verlag. Tokio. 81-88 p.
- L. Ljung, and T. Glad 1994.** Modeling of Dynamic Systems Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1994)
- Mann, M., Amman, C., Bradley, R., Briffa, K., Jones, P., Osborn, T., ... & Wigley, T. 2003.** On past temperatures and anomalous late-20th-century warmth. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 84(27), 256-256.
- McMaster, G. S. y Wilhelm, W. W. 1997.** Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 291-300.
- Mejía S. E., A. Exebio G., E. Palacios V., A. L. Santos H., M. E. Delgadillo P. 2003.** Mejoramiento del manejo de distritos y módulos de riego utilizando Sistemas de Información Geográfica. *Terra Latinoamericana* 21 (4): Pp 513-522.
- Monteith, J. L. 1981.** Climatic variation and the growth of crops. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 107: 749–774
- Monteith, J. L. (1996).** The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*, 88(5), 695-697.
- Ojeda, B.W.; Sifuentes, I.E., Íñiguez, C.M. y Montero, M.M.J. 2011.** Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencias Montecillos, Edo de México* 45:1-11.
- Ojeda-Bustamante, W., J. M. González-Camacho, E. Sifuentes- Ibarra, E. Isidro, and L. Rendón-Pimentel. 2007.** Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agric. Water Manage.* 89: 81-88.

- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, D. C. Slack, and M. Carrillo. 2004.** Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53:251-261.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E. y Unland, W.H. 2006.** Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, *Agrociencias* 40 13-25. Montecillos, Edo. México.
- Palacios Vélez E. 1981.** Manual de operación de distrito de riego. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Tercera Edición. Pp. 326.
- Rabbinge, R. y De Wit, C. T. 1989.** Systems, models and simulation. In R. Rabbinge, S. A. Ward y H. H. Van Laar (eds), *Simulation and systems management in crop protection*, Pudoc, Wageningen. Pp. 3-15.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. 2009.** AquaCrop The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.
- Ríos, M. J.; Quirós D. J. Y Arias, J. H. 2002.** Fríjol, recomendaciones generales para su siembra y manejo. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Cartilla ilustrada 2. Colombia. 48 pp.
- Ríos, M., J. y Quirós D., J. 2002.** El Fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.): Cultivo, beneficio y variedades. Boletín Técnico. FENALCE. Bogotá. 193 pp.
- Ritchie, S. W. y Hanway, J. J. 1984.** How a com plant Develops. Special Report No. 48. Cooperative Extension Service, Ames, Iowa.

- Ritchie, J. T., Godwin, D. C., & Otter-Nacke, S. 1985.** CERES-Wheat. A simulation model of wheat growth and development. *ARS (1985).*(págs. 159-175). *US Department of Agriculture.*
- Rodríguez, J. A., E. K. Weatherhead, J. W. Knox, and E. Camacho. 2007.** Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environ. Change* 7: 149–159.
- Rosenzweig, C., and M. M. Daniel. 1989.** Agriculture. *In:* Smith J. B., and D. A. Tirpak. (eds). *The Potential Effects of Global Change on the United States.* Chapter 6. EPA (Environmental Protection Agency). EPA–230–05–89–050. Washington, USA. pp: 89–117.
- Rowe, C. R. 1993.** *What is a Healthy Potato plant.* Edited by Randall: *In* Potato Health Management. Department of Plant Pathology. Ohio State University Wooste. Pp 4-7.
- Sands, P. J., Hackett, C. 1979.** A Model of the Development and Bulking of potatoes (*Solanum Tuberosum* L.) I. Derivation from well – manager field crops. *Field Crops Res.*, 2: 309-331.
- Schwartz, M.D., G.J. Carbone, G.L. Reighard, and W.R. Okie. 1997.** A model to predict peach phenology and maturity using meteorological variables. *Hort-Science* 32:213–216
- Seager, R., R. Burgman, Y. Kushnir, A. C. Clement, E. R. Cook, N. Naik and J. Miller, 2007:** Tropical Pacific forcing of North American Medieval megadroughts; Testing the concept with an atmosphere model forced by coral-reconstructed SSTs *J. Climate*, submitted.
- Shayya, W. H., V.F. Bralts, and T.R. Olmstead. 1990.** A general Irrigation Scheduling Package for Microcomputers. *Computers and Electronics in Agriculture.* Elsevier

Scientific Publishing Co. Amsterdam, The Netherlands. 5:197-212 Spooner, D. M., Mclean, K.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2013. Información estadística agrícola con desagregación geográfica de acuerdo en nivel Distrito de Desarrollo Rural (DDR) y nivel municipal. Disponible en línea en el portal del SIAP: <http://www.siap.gob.mx/>

Sifuentes I. E., Macías C. J., Apodaca S. M. A. y Cortez M. E. 2009. Predicción de la fenología de papa (principios y aplicaciones prácticas). INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Valle del Fuerte. Folleto Técnico No. 32. Los Mochis, Sinaloa, México. 54 pp.

Sifuentes. I. E., Ojeda-Bustamante W., J.G. Quintana y J. Macías. 2010. Jornada sobre impacto y adaptación al cambio climático de la agricultura del estado de Sinaloa. Memoria técnica: 5. Los Mochis Sinaloa México. 63 pp.

Sifuentes I., E., Ojeda Bustamante, W., Mendoza Pérez, C., Macías Cervantes, J., Rúelas Islas, J.R. y Marco Antonio Inzunza Ibarra, M.A. 2013. Nutrición del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) considerando variabilidad climática en el “Valle del Fuerte”, Sinaloa, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 4(4):585-597.

Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. (SIACON-SIAP). Fecha de Consulta; 18/02/10. <http://www.siap.gob.mx>

Soboh, G., Sully, R. y Hopkins, H. 2000. Mecanismos para incrementar el número de tubérculos. Boletín de la Papa, RedePapa. Vol.3, nº4.

Spitters C J T 1989 Weeds. Population dynamics, germination and competition. In Simulation and Systems Management in Crop Protection, Ed, R Rabbinge, S A

- Ward and H H van 202 Spitters and Schapendonk Laar. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 32, 182- 216.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003.** CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289e307.
- Summerfield, R.J., Roberts, E.H., Ellis, R.H., Lawn, R.J., 1991.** Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Exp. Agric.*, 27: 11-31.
- ThornleyJHM, Johnson IR.2000.** *Plant and crop modelling. A mathematical approach to plant and crop physiology.* Reprint of 1990 Oxford University Press edition.
- Van Dam, J.; Kooman, P. L. and Struik, P. C. 1996.** Effects of temperature and photoperiod on early growth and final number of tubers in potato (*Solanum tuberosum* L.) *Potato Research*, 39:51-62.
- Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. 2003.** On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 201-234.
- Van Keulen, H., Penning de Vries, F.W.T., Drees, E.M., 1982.** A summary model for crop growth. In: Penning de Vries,F.W.T., Van Laar, H.H. (Eds.), *Simulation of Plant Growthand Crop Production.* Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 87/98
- Vatn, A., 2002.** Multifunctional agriculture: Some consequences for international trade regimes. *Eur. Rev. Agric. Econ.* 29, 309–327.
- Villalpando. 2001.** Requerimientos agroecológicos de los cultivos. INIFAP

Villalpando, J. y A. Ruiz, 1993. Observaciones Agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Editorial Limusa, México. p. 133

Villordon, A.; Clark, C.; Ferrin D. y Don LaBonte. 2009. Using Growing Degree Days, Agrometeorological Variables, Linear Regression, and Data Mining Methods to Help Improve Prediction of Sweetpotato Harvest Date in Louisiana. *Horttechnology* 19: 133-144.

Walker W. and Skogerboe, G. 1987. Surface Irrigation Theory and Practice. Prentice Hall, New York.

Wang, J.Y. 1960. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41:785-790.

Wanjura, D. F. and D. R. Upchurch. 2000. *Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status.* Trans. of the ASAE. 43:867-875.

White Jeffrey W. 1998. Conceptos Básicos de la Fisiología Vegetal del Fríjol. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia. Pp 25-26.

Willmott CJ, Matsuura K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* 30: 79–82.

Willmott CJ, Matsuura K, Robeson SM. 2009. Ambiguities inherent in sums-of-squares-based error statistics. *Atmospheric Environment* 43(3): 749–752.

<http://www.agroplasmausa.com/universal.htm>

Yang, H. S., Dobermann, A., Lindquist, J. L., Walters, D. T., Arkebauer, T. J., & Cassman, K. G. (2004). Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*, 87(2), 131-154.

VII. ANEXOS

Anexo A

Muestreo foliar

Muestreos foliares realizados al cultivo de frijol.

| Muestreo | Fecha | PSH (g·m ⁻²) | PST (g·m ⁻²) | PSR (g·m ⁻²) | PSV (g·m ⁻²) | Total (g·m ⁻²) |
|----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 4/12/2010 | 35 | 2.5 | 2.5 | - | 40 |
| 2 | 17/12/2010 | 176.6 | 38.5 | 15 | - | 230.1 |
| 3 | 31/12/2010 | 177 | 41.2 | 17.5 | - | 235.7 |
| 4 | 14/01/2011 | 360 | 103.2 | 22.5 | 7.5 | 493.2 |
| 5 | 28/01/2011 | 436.5 | 200.625 | 35 | 15 | 687.125 |

Muestreos foliares realizados al cultivo de papa

| Muestreo | Fecha | PSH+T (g·m ⁻²) | PSR (g·m ⁻²) | PSTuberculo (g·m ⁻²) | Total (g·m ⁻²) |
|----------|------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 17/12/2010 | 194.6 | 165.0 | - | 359.6 |
| 2 | 31/12/2010 | 323.0 | 239.5 | 563.5 | 1126 |
| 3 | 18/01/2011 | 680.4 | 22.0 | 1982.4 | 2684.8 |
| 4 | 29/01/2011 | 566.4 | 51.0 | 2157.8 | 2775.2 |
| 5 | 15/02/2011 | 479.2 | 48.0 | 1921.9 | 2449.1 |
| 6 | 23/02/2011 | 263.1 | 53.7 | 2338.0 | 2654.8 |

Psh+T; peso seco de hoja mas tallo. Psr; peso seco raíz. Ps; peso seco

Anexo B

Descripción detallada de archivos de salida correspondientes a manejo productivo y agua de riego para el cultivo de papa.

Desarrollo y producción del cultivo

| Decena | Mes | Año | GD °D | Z M | St Exp % | St Sto % | CC % | Kcb | Trx Mm | Tr mm | Tr/Trx % | Bio ton ha ⁻¹ | Hi % | Yield Part ton ha ⁻¹ | Brel (w) % | Brel (wsf) % | WPet (B) Kg/m3 | WPet (Y) Kg/m3 |
|--------|-----|-----|----------|--------|----------------|----------------|---------|------|-----------|----------|-------------|--------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 2 | 11 | 08 | 208.6 | 0.3 | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | - | 0 | - | - | 0 | 0 |
| 3 | 11 | 08 | 180.2 | 0.31 | -1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | - | 0 | 13 | 13 | 0 | 0 |
| 1 | 12 | 08 | 184.5 | 0.37 | 30 | 0 | 1.2 | 0.02 | 0.7 | 0.7 | 100 | .02 | - | 0 | 78 | 78 | 0.09 | 0 |
| 2 | 12 | 08 | 190 | 0.43 | 16 | 0 | 5.8 | 0.11 | 3.7 | 3.7 | 100 | .12 | - | 0 | 48 | 48 | 0.39 | 0 |
| 3 | 12 | 08 | 196 | 0.48 | 12 | 0 | 41.8 | 0.6 | 23 | 23 | 100 | .81 | - | 0 | 48 | 48 | 1.41 | 0 |
| 1 | 1 | 09 | 185.5 | 0.5 | 22 | 0 | 82 | 0.99 | 31.4 | 31.4 | 100 | 2.58 | - | 0 | 69 | 69 | 2.95 | 0 |
| 2 | 1 | 09 | 156.6 | 0.5 | 22 | 0 | 93.2 | 1.06 | 35.1 | 35.1 | 100 | 4.69 | 1.4 | 0.116 | 79 | 79 | 3.75 | 0.09 |
| 3 | 1 | 09 | 168.8 | 0.5 | - | 0 | 95 | 1.06 | 42.3 | 42.3 | 100 | 6.82 | 9.3 | 0.656 | 85 | 85 | 4.21 | 0.39 |
| 1 | 2 | 09 | 151.8 | 0.5 | - | 0 | 95 | 1.05 | 39.6 | 39.6 | 100 | 9.00 | 27.6 | 2.52 | 88 | 88 | 4.43 | 1.22 |
| 2 | 2 | 09 | 167.4 | 0.5 | - | 2 | 94.5 | 1.02 | 43.3 | 42.4 | 98 | 11.01 | 54.4 | 6.035 | 90 | 90 | 4.52 | 2.46 |
| 3 | 2 | 09 | 125.4 | 0.5 | - | 3 | 92.6 | 0.98 | 36.9 | 35.7 | 97 | 12.76 | 73.5 | 9.389 | 91 | 91 | 4.5 | 3.3 |
| 1 | 3 | 09 | 165.5 | 0.5 | - | 2 | 90.2 | 0.93 | 52.1 | 50.8 | 98 | 14.40 | 82.2 | 11.848 | 92 | 92 | 4.38 | 3.6 |
| 2 | 3 | 09 | 175.5 | 0.1 | - | -0 | 17.7 | 0.18 | 9.7 | 6.4 | 93 | 15.4 | 84.8 | 13.060 | 91 | 91 | 4.29 | 3.64 |

Wp= 16.9 g/m² ; StBio (%) = 0 ; St Sen% = 0 (exceptp decena 2 mes 2 =1)

Nomenclatura

| | |
|------------------|---|
| <i>DAP;</i> | <i>Días después de siembra</i> |
| <i>Etapas;</i> | <i>0: antes / después de siembra, 1; germinación o trasplante, 2; Etapa vegetativa 3; floración, 4; formación de cosecha y madurez.</i> |
| <i>GD;</i> | <i>Grados días</i> |
| <i>Z;</i> | <i>Profundidad efectiva de las raíces.</i> |
| <i>StExp;</i> | <i>Porcentaje reducido de expansión de hoja por estrés hídrico</i> |
| <i>StSto;</i> | <i>Porcentaje de estrés hídrico que induce el cierre de estomas</i> |
| <i>StSen;</i> | <i>Porcentaje de estrés hídrico que induce la senescencia del dosel temprana</i> |
| <i>CC;</i> | <i>Cobertura de dosel verde</i> |
| <i>Kcb;</i> | <i>Coefficiente basal del cultivo</i> |
| <i>Trx;</i> | <i>Máxima transpiración del cultivo</i> |
| <i>Tr;</i> | <i>Transpiración del cultivo</i> |
| <i>Tr/Trx;</i> | <i>Transpiración relativa del cultivo (100 Tr/Trx)</i> |
| <i>WP;</i> | <i>Productividad del agua ajustada para el CO₂, fertilidad del suelo y productos sintetizados.</i> |
| <i>StBio;</i> | <i>Porcentaje de estrés térmico que afecta la producción de biomasa</i> |
| <i>Biomass;</i> | <i>Biomasa producida acumulada</i> |
| <i>HI;</i> | <i>Índice de cosecha ajustada a la polinización, fotosíntesis inadecuada y estrés por agua.</i> |
| <i>Yield</i> | <i>Cosecha, (HI * Biomass)</i> |
| <i>Part;</i> | |
| <i>Brel (W);</i> | <i>Porcentaje de biomasa producida (referencia: Buen riego y suelo bien fertilizado)</i> |
| <i>Brel</i> | <i>Porcentaje de biomasa producida (referencia: dada la fertilidad del suelo, pero bien regado el suelo)</i> |
| <i>(wsf);</i> | |
| <i>WPet (B);</i> | <i>Biomasa producida por evapotranspiración del agua (kg de biomasa producida por m³ de agua evapotranspirada).</i> |
| <i>WPet (Y);</i> | <i>ET productividad del agua para la parte de rendimiento (kg de cosecha producido por m³ de agua evapotranspirada)</i> |

Anexo B-1

BALANCE DEL AGUA EN EL SUELO PARA EL CULTIVO DE PAPA

| Decena | Mes | Año | WCTot | Rain | Irrigation | Infiltrated | Drained | Ex | E | E/Ex | Trx | Tr | Tr/Trx | ETx | ET | ET/ETx |
|--------|-----|-----|-------|------|------------|-------------|---------|------|------|------|------|------|--------|------|------|--------|
| | | | Mm | Mm | Mm | Mm | Mm | mm | mm | % | mm | mm | % | Mm | mm | % |
| 2 | 11 | 08 | 421.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40.7 | 15.4 | 38 | 0 | 0 | 100 | 40.7 | 15.4 | 38 |
| 3 | 11 | 08 | 413.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.6 | 5 | 13 | 0 | 0 | 100 | 39.6 | 5.1 | 13 |
| 1 | 12 | 08 | 409.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.6 | 2.7 | 8 | 0.7 | 0.7 | 100 | 34.4 | 3.3 | 10 |
| 2 | 12 | 08 | 426 | 0 | 56 | 56 | 14.1 | 33.7 | 13.9 | 42 | 3.7 | 3.7 | 100 | 37.5 | 17.9 | 47 |
| 3 | 12 | 08 | 412.4 | 0.2 | 0 | 0 | 7 | 15.6 | 4.8 | 28 | 23 | 23 | 100 | 38.5 | 27.7 | 72 |
| 1 | 1 | 09 | 420 | 0 | 59 | 59 | 6.7 | 2.7 | 1.5 | 73 | 31.4 | 31.4 | 100 | 34 | 32.8 | 97 |
| 2 | 1 | 09 | 413.1 | 0 | 61 | 61 | 2.3 | 0.7 | 0.6 | 89 | 35.1 | 35.1 | 100 | 35.8 | 35.7 | 100 |
| 3 | 1 | 09 | 414.4 | 0 | 61 | 61 | 8.8 | 0 | 0 | 100 | 42.3 | 42.3 | 100 | 42.6 | 42.6 | 100 |
| 1 | 2 | 09 | 418.9 | 0.2 | 0 | 0 | 12.2 | 0 | 0 | 55 | 39.6 | 39.6 | 100 | 39.9 | 39.8 | 100 |
| 2 | 2 | 09 | 412.1 | 0 | 63 | 63 | 1 | 0.6 | 0.6 | 64 | 43.3 | 43.4 | 98 | 43.8 | 42.7 | 97 |
| 3 | 2 | 09 | 402.3 | 0 | 63 | 63 | 1.7 | 0.8 | 0.8 | 100 | 36.9 | 35.7 | 97 | 37.8 | 36.6 | 97 |
| 1 | 3 | 09 | 410.1 | 0 | 0 | 0 | 3.3 | 2 | 1.8 | 93 | 52.1 | 50.8 | 98 | 54.2 | 52.7 | 98 |
| 2 | 3 | 09 | 377.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45.6 | 3.9 | 9 | 9.7 | 6.4 | 93 | 55.4 | 10.4 | 20 |

Top Surface (mm³) = 0; Runof (mm³) = 0

Nomenclatura

| | |
|---------------------|---|
| <i>DAP;</i> | <i>Días despues de siembra</i> |
| <i>Etapa;</i> | <i>0: antes / después de siembra, 1; germinación o trasplante, 2; Etapa vegetativa 3; floración, 4; formacion de cosecha y madurez.</i> |
| <i>WCTot;</i> | <i>Contenido de agua en el total del perfil del suelo.</i> |
| <i>Rain;</i> | <i>Lluvia</i> |
| <i>Irrigation;</i> | <i>Agua aplicada por riego</i> |
| <i>Top Surface;</i> | <i>Agua almacenada entre la superficie del suelo</i> |
| <i>Infiltrated;</i> | <i>Agua infiltrada en el perfil del suelo</i> |
| <i>Run Off;</i> | <i>Escorrentía superficial.</i> |
| <i>Drained;</i> | <i>Agua drenada fuera del perfil del suelo</i> |
| <i>Ex;</i> | <i>Máxima evaporación del suelo</i> |
| <i>E/Ex;</i> | <i>Evaporación relativa del suelo (100 E/Ex)</i> |
| <i>Trx;</i> | <i>Máxima transpiración del cultivo</i> |
| <i>Tr;</i> | <i>Transpiración del cultivo</i> |
| <i>Tr/Trx;</i> | <i>Transpiración relativa del cultivo (100 Tr/Trx)</i> |
| <i>Etx;</i> | <i>Evapotranspiración máxima</i> |
| <i>ET;</i> | <i>Evapotranspiración</i> |
| <i>Et/Etx;</i> | <i>Evapotranspiración relativa (100 ET/ETx)</i> |

Anexo B-2

CONTENIDO DEL AGUA EN EL SUELO (perfil y zona de raíces) PARA EL CULTIVO DE PAPA

| Decena | Mes | Año | WCT ot Mm | Wr(Zx) Mm | Z M | Wr mm | Wr(sat) Mm | Wr(FC) Mm | Wr(exp) mm | Wr(sto) Mm | Wr(sen) Mm | Wr(PWP) mm |
|--------|-----|-----|--------------|--------------|--------|----------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2 | 11 | 08 | 421.4 | 169.4 | 0.3 | 97.4 | 150 | 108 | 99.6 | 83.3 | 84.9 | 66 |
| 3 | 11 | 08 | 413.3 | 161.3 | 0.31 | 92.9 | 1544.9 | 111.6 | 101.9 | 86 | 86.9 | 68.2 |
| 1 | 12 | 08 | 409.6 | 157.6 | 0.37 | 110.8 | 184.9 | 133.1 | 119.2 | 102 | 102 | 81.4 |
| 2 | 12 | 08 | 426 | 172.3 | 0.43 | 145.8 | 213.6 | 153.8 | 138.9 | 118.6 | 118.6 | 94 |
| 3 | 12 | 08 | 412.4 | 159.9 | 0.48 | 152.1 | 239.2 | 172.2 | 155.5 | 132.6 | 132.6 | 105.2 |
| 1 | 1 | 09 | 420 | 167.2 | 0.5 | 167.2 | 250 | 180 | 161.3 | 137.9 | 137.9 | 110 |
| 2 | 1 | 09 | 413.1 | 160.8 | 0.5 | 160.8 | 250 | 180 | 161.7 | 138.1 | 138.1 | 110 |
| 3 | 1 | 09 | 414.1 | 161.3 | 0.5 | 161.3 | 250 | 180 | 162.4 | 138.7 | 138.7 | 110 |
| 1 | 2 | 09 | 418.9 | 165.6 | 0.5 | 165.6 | 250 | 180 | 162.9 | 139.1 | 139.1 | 110 |
| 2 | 2 | 09 | 412.1 | 159.9 | 0.5 | 159.9 | 250 | 180 | 164 | 140.9 | 140.9 | 110 |
| 3 | 2 | 09 | 402.3 | 150.1 | 0.5 | 150.1 | 250 | 180 | 165.2 | 140.9 | 140.9 | 110 |
| 1 | 3 | 09 | 410.1 | 157.8 | 0.5 | 157.8 | 250 | 180 | 167.6 | 142.7 | 142.7 | 110 |
| 2 | 3 | 09 | 377.2 | 125.2 | 0.1 | 17.7 | 42.1 | 28.1 | 25.5 | 20.6 | 20.6 | 14.1 |

Nomenclatura

| | |
|------------------|---|
| <i>DAP;</i> | <i>Días después de siembra</i> |
| <i>Etapa;</i> | <i>0: antes / después de siembra, 1; germinación o trasplante, 2; Etapa vegetativa 3; floración, 4; formación de cosecha y madurez.</i> |
| <i>WCTot;</i> | <i>Contenido de agua en el total del perfil del suelo (capa 0.0-1.2 m)</i> |
| <i>Wr(Zx);</i> | <i>Máximo contenido de agua en la zona efectiva de raíces.</i> |
| <i>Z;</i> | <i>Profundidad efectiva de raíces.</i> |
| <i>Wr;</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz.</i> |
| <i>Wr (Sat);</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz a saturación.</i> |
| <i>Wr (fc);</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz a capacidad de campo.</i> |
| <i>Wr (exp);</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz en el umbral superior por expansión de hoja.</i> |
| <i>Wr (sto);</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz en el umbral superior por cierre de estomas.</i> |
| <i>Wr (sen);</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz en el umbral superior por senescencia temprana del dosel.</i> |
| <i>Wr (PWP);</i> | <i>Contenido de agua en la zona efectiva de raíz a punto de marchitez permanente.</i> |

Anexo B-3

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (compartimientos) PARA EL CULTIVO DE PAPA

| Decena | Mes | Año | WC1 Vol% | WC2 Vol% | WC3 Vol3 | WC4 Vol% | WC5 Vol% | WC6 Vol% | WC7 Vol% | WC8 Vol% | WC9 Vol% | WC10 Vol% | WC11 Vol% | WC12 Vol% |
|--------|-----|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 2 | 11 | 08 | 25.4 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 3 | 11 | 08 | 17.3 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 1 | 12 | 08 | 14 | 35.7 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 2 | 12 | 08 | 23.6 | 38.1 | 37.4 | 36.7 | 36.5 | 36.4 | 36.3 | 36.3 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.2 |
| 3 | 12 | 08 | 21.4 | 30.5 | 35.8 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 |
| 1 | 1 | 09 | 28.2 | 33.9 | 32.5 | 36.3 | 36.2 | 36.2 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 |
| 2 | 1 | 09 | 26.6 | 29.8 | 32.3 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 3 | 1 | 09 | 24.9 | 30.3 | 33.9 | 36 | 36.2 | 36.2 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 |
| 1 | 2 | 09 | 24.5 | 31.9 | 36.4 | 36.5 | 36.3 | 36.3 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.2 |
| 2 | 2 | 09 | 26.4 | 32.5 | 30.7 | 34.6 | 35.7 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 3 | 2 | 09 | 23.8 | 26.2 | 29.8 | 34.3 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 1 | 3 | 09 | 23.1 | 29.8 | 33.8 | 34.9 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| 2 | 3 | 09 | 17.6 | 21.9 | 21.8 | 28.6 | 35.5 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

Nomenclatura

| | |
|---------------|---|
| <i>DAP;</i> | <i>Días después de siembra</i> |
| <i>Etapa;</i> | <i>0: antes / después de siembra, 1; germinación o trasplante, 2; Etapa vegetativa 3; floración, 4; formación de cosecha y madurez.</i> |
| <i>WC 1;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 1: a profundidad de 0.05m)</i> |
| <i>WC 2;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 2: a profundidad de 0.15m)</i> |
| <i>WC 3;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 3: a profundidad de 0.25m)</i> |
| <i>WC 4;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 4: a profundidad de 0.35m)</i> |
| <i>WC 5;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 5: a profundidad de 0.45m)</i> |
| <i>WC 6;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 6: a profundidad de 0.55m)</i> |
| <i>WC 7;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 7: a profundidad de 0.65m)</i> |
| <i>WC 8;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 8: a profundidad de 0.75m)</i> |
| <i>WC 9;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 9: a profundidad de 0.85m)</i> |
| <i>WC 10;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 10: a profundidad de 0.95m)</i> |
| <i>WC 11;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 11: a profundidad de 1.05m)</i> |
| <i>WC 12;</i> | <i>Contenido de agua en el suelo (compartimiento 12: a profundidad de 1.15m)</i> |

Anexo C

Descripción detallada de archivos de salida correspondientes a manejo productivo y agua de riego para el cultivo de frijol.

Desarrollo y producción del cultivo

| Decena | Mes | Año | GD °D | Z M | St Sto % | CC % | Kcb | Trx Mm | Tr mm | WP g/m ² | StBio % | Bio ton ha ⁻¹ | Hi % | Yield Part ton ha ⁻¹ | Brel (w) % | Brel (wsf) % | WPet (B) Kg/m3 | WPet (Y) Kg/m3 |
|--------|-----|-----|----------|--------|----------------|---------|------|-----------|----------|------------------------|------------|--------------------------------|---------|--|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 2 | 11 | 09 | 83 | 0.3 | - | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 17.6 | 0 | 0.000 | - | 0 | - | - | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 11 | 09 | 106.2 | 0.31 | - | 0.3 | 0.01 | 0.3 | 0.3 | 17.6 | 2 | 0.002 | - | 0 | 24 | 24 | 0.01 | 0.00 |
| 1 | 12 | 09 | 103.5 | 0.39 | 0 | 3.3 | 0.06 | 1.9 | 1.9 | 17.6 | 2 | 0.057 | - | 0 | 100 | 100 | 0.16 | 0.00 |
| 2 | 12 | 09 | 80.2 | 0.45 | 0 | 11.6 | 0.20 | 7.3 | 7.3 | 17.6 | 12 | 0.263 | - | 0 | 100 | 100 | 0.54 | 0.00 |
| 3 | 12 | 09 | 81.5 | 0.49 | 0 | 35.7 | 0.54 | 18.6 | 18.6 | 17.5 | 16 | 0.845 | - | 0 | 100 | 100 | 1.06 | 0.00 |
| 1 | 1 | 09 | 75.5 | 0.53 | 0 | 68.3 | 0.88 | 32.6 | 32.6 | 13.4 | 21 | 1.885 | - | 0.003 | 100 | 100 | 1.59 | 0.00 |
| 2 | 1 | 10 | 92.5 | 0.58 | 0 | 83.8 | 1.0 | 39.2 | 39.2 | 10.5 | 4 | 3.256 | 4.4 | 0.150 | 100 | 100 | 2.07 | 0.09 |
| 3 | 1 | 10 | 101.1 | 0.6 | 0 | 88.3 | 1.04 | 40.2 | 40.2 | 10.5 | 5 | 4.412 | 14.3 | 0.643 | 100 | 100 | 2.21 | 0.32 |
| 1 | 2 | 10 | 94.5 | 0.6 | 0 | 89.7 | 1.03 | 36.2 | 36.2 | 10.5 | 3 | 5.522 | 25.2 | 1.399 | 100 | 100 | 2.31 | 0.58 |
| 2 | 2 | 10 | 92.5 | 0.6 | 0 | 90.0 | 1.01 | 43.9 | 43.9 | 10.5 | 5 | 6.540 | 34.0 | 2.225 | 100 | 100 | 2.33 | 0.79 |
| 3 | 2 | 10 | 80.1 | 0.6 | 0 | 90.0 | 0.98 | 43.6 | 43.6 | 10.5 | 1 | 7.452 | 35.0 | 2.608 | 100 | 100 | 2.27 | 0.79 |
| 1 | 3 | 10 | 105.5 | 0.6 | 4 | 89.9 | 0.96 | 45.7 | 43.3 | 10.5 | 2 | 8.355 | 35.0 | 2.924 | 100 | 100 | 2.23 | 0.78 |
| 2 | 3 | 10 | 115.5 | 0.6 | 65 | 88.9 | 0.92 | 56.1 | 19.0 | 10.5 | 1 | 8.989 | 35.0 | 3.146 | 97 | 97 | 2.20 | 0.77 |
| 3 | 3 | 10 | 26.3 | 0.6 | 40 | 44 | 0.45 | 6.2 | 0.7 | 10.5 | 0 | 9.105 | 35.0 | 3.187 | 93 | 93 | 2.18 | 0.76 |

StSen (%) = 0. StExp% = 0 (excepto decena1 mes 12 = 3). Tr/Trx %=100 (excepto decena 1,2 y 3 del mes 3. 96, 35 y 56 respectivamente)

Anexo C-1

BALANCE DEL AGUA EN EL SUELO PARA EL CULTIVO DE FRIJOL

| Decena | Mes | Año | WCT ot Mm | Rain Mm | Irrigation Mm | Infiltrated Mm | Drained mm | Ex mm | E mm | E/Ex % | Trx mm | Tr mm | Tr/Trx % | ETx Mm | ET mm | ET/ETx % |
|--------|-----|-----|--------------|------------|------------------|-------------------|---------------|----------|---------|-----------|-----------|----------|-------------|-----------|----------|-------------|
| 2 | 11 | 09 | 422.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 28.3 | 12.7 | 46 | 0.0 | 0.0 | 100 | 28.3 | 12.7 | 46 |
| 3 | 11 | 09 | 426.0 | 0.0 | 18.0 | 18.0 | 0.5 | 21.9 | 9.5 | 61 | 0.3 | 0.3 | 100 | 22.0 | 9.6 | 62 |
| 1 | 12 | 09 | 426.9 | 1.2 | 20.0 | 21.2 | 1.2 | 23.8 | 15.1 | 70 | 1.9 | 1.9 | 100 | 25.9 | 17.2 | 73 |
| 2 | 12 | 09 | 440.5 | 8.4 | 46.0 | 54.4 | 12.2 | 11.9 | 9.1 | 71 | 7.3 | 7.3 | 100 | 19.1 | 16.4 | 83 |
| 3 | 12 | 09 | 474.6 | 179.8 | 23.0 | 202.8 | 174.7 | 20.0 | 19.4 | 97 | 18.6 | 18.6 | 100 | 38.6 | 38.1 | 98 |
| 1 | 1 | 09 | 491.7 | 222.4 | 51.0 | 273.4 | 221.8 | 8.2 | 8.2 | 100 | 32.6 | 32.6 | 100 | 40.7 | 40.7 | 100 |
| 2 | 1 | 10 | 433.5 | 15.0 | 23.0 | 38.0 | 26.1 | 2.9 | 2.5 | 83 | 39.2 | 39.2 | 100 | 42.1 | 41.7 | 99 |
| 3 | 1 | 10 | 446.2 | 33.0 | 47.0 | 80.0 | 35.2 | 2.4 | 2.4 | 100 | 40.2 | 40.2 | 100 | 42.5 | 42.5 | 100 |
| 1 | 2 | 10 | 432.1 | 10.0 | 49.0 | 59.0 | 12.2 | 1.7 | 1.7 | 100 | 36.2 | 36.2 | 100 | 38.0 | 38.0 | 100 |
| 2 | 2 | 10 | 438.5 | 19.0 | 45.0 | 64.0 | 12.9 | 2.0 | 2.0 | 100 | 43.9 | 43.9 | 100 | 46.1 | 46.1 | 100 |
| 3 | 2 | 10 | 433.0 | 11.0 | 25.0 | 36.0 | 21.7 | 2.2 | 2.2 | 100 | 43.6 | 43.6 | 100 | 45.7 | 45.7 | 100 |
| 1 | 3 | 10 | 391.8 | 11.0 | 0.0 | 11.0 | 0.8 | 2.3 | 2.3 | 100 | 45.7 | 43.3 | 96 | 47.9 | 45.6 | 96 |
| 2 | 3 | 10 | 361.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.3 | 3.3 | 100 | 56.1 | 19.0 | 35 | 59.5 | 22.5 | 38 |
| 3 | 3 | 10 | 352.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6.8 | 0.8 | 44 | 6.2 | 0.7 | 56 | 13.1 | 1.5 | 12 |

Top Surface (mm³) = 0; Runof (mm³) = 0

Anexo C-2

CONTENIDO DEL AGUA EN EL SUELO PARA EL CULTIVO DE FRIJOL

| Decena | Mes | Año | WCT ot Mm | Wr(Zx) Mm | Z M | Wr mm | Wr(sat) Mm | Wr(FC) mm | Wr(exp) mm | Wr(sto) Mm | Wr(sen) Mm | Wr(PWP) mm |
|--------|-----|-----|--------------|--------------|--------|----------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2 | 11 | 09 | 422.9 | 206.9 | 0.30 | 98.9 | 150.0 | 108.0 | 101.7 | 86.1 | 78.6 | 66.0 |
| 3 | 11 | 09 | 426.0 | 210.0 | 0.31 | 106.3 | 156.0 | 112.2 | 105.0 | 88.7 | 81.3 | 68.6 |
| 1 | 12 | 09 | 426.9 | 210.7 | 0.39 | 133.5 | 192.8 | 138.8 | 127.4 | 109.2 | 99.0 | 84.9 |
| 2 | 12 | 09 | 440.5 | 223.5 | 0.45 | 168.1 | 223.8 | 161.2 | 148.5 | 127.3 | 115.3 | 98.5 |
| 3 | 12 | 09 | 474.6 | 243.3 | 0.49 | 202.2 | 247.3 | 178.1 | 163.0 | 139.7 | 126.7 | 108.8 |
| 1 | 1 | 09 | 491.7 | 255.1 | 0.53 | 228.9 | 267.6 | 192.7 | 177.8 | 152.4 | 138.0 | 117.8 |
| 2 | 1 | 10 | 433.5 | 215.5 | 0.58 | 208.1 | 290.0 | 208.8 | 193.3 | 165.6 | 149.9 | 127.6 |
| 3 | 1 | 10 | 446.2 | 227.4 | 0.60 | 227.4 | 300.0 | 216.0 | 198.8 | 170.3 | 154.4 | 132.0 |
| 1 | 2 | 10 | 432.1 | 215.2 | 0.60 | 215.2 | 300.0 | 216.0 | 198.7 | 170.3 | 154.4 | 132.0 |
| 2 | 2 | 10 | 438.5 | 221.3 | 0.60 | 221.3 | 300.0 | 216.0 | 201.4 | 172.4 | 156.0 | 132.0 |
| 3 | 2 | 10 | 433.0 | 214.8 | 0.60 | 214.8 | 300.0 | 216.0 | 205.1 | 175.3 | 158.2 | 132.0 |
| 1 | 3 | 10 | 391.8 | 175.7 | 0.60 | 175.7 | 300.0 | 216.0 | 202.7 | 173.4 | 156.8 | 132.0 |
| 2 | 3 | 10 | 361.5 | 145.5 | 0.60 | 154.5 | 300.0 | 216.0 | 206.0 | 176.8 | 159.3 | 132.0 |
| 3 | 3 | 10 | 352.4 | 136.3 | 0.60 | 136.3 | 300.0 | 216.0 | 209.7 | 179.6 | 161.0 | 132.0 |

Anexo C-3

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO PARA EL CULTIVO DE FRIJOL

| Decena | Mes | Año | WC1 Vol% | WC2 Vol% | WC3 Vol3 | WC4 Vol% | WC5 Vol% | WC6 Vol% | WC7 Vol% | WC8 Vol% | WC9 Vol% | WC10 Vol% | WC11 Vol% | WC12 |
|--------|-----|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------|
| 2 | 11 | 09 | 26.9 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |
| 3 | 11 | 09 | 29.8 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |
| 1 | 12 | 09 | 30.3 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |
| 2 | 12 | 09 | 38.5 | 38.6 | 37.1 | 36.4 | 36.4 | 36.3 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.1 | 36.1 | 36.1 |
| 3 | 12 | 09 | 38.7 | 41.9 | 41.6 | 40.3 | 40.3 | 39.2 | 39.1 | 39.0 | 38.9 | 38.9 | 37.8 | 37.5 |
| 1 | 1 | 09 | 44.9 | 45.5 | 43.0 | 40.5 | 40.5 | 40.0 | 39.9 | 39.7 | 39.6 | 39.5 | 39.5 | 38.4 |
| 2 | 1 | 10 | 32.0 | 37.0 | 36.8 | 36.5 | 36.5 | 36.5 | 36.4 | 36.4 | 36.3 | 36.3 | 36.3 | 36.3 |
| 3 | 1 | 10 | 38.3 | 40.0 | 38.1 | 37.3 | 37.0 | 36.8 | 36.6 | 36.5 | 36.5 | 36.4 | 36.4 | 36.3 |
| 1 | 2 | 10 | 33.1 | 36.6 | 36.6 | 36.4 | 36.3 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.1 | 36.1 |
| 2 | 2 | 10 | 36.1 | 38.2 | 37.2 | 36.9 | 36.5 | 36.4 | 36.3 | 36.3 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 36.1 |
| 3 | 2 | 10 | 32.1 | 35.3 | 37.1 | 37.0 | 36.7 | 36.5 | 36.5 | 36.4 | 36.4 | 36.3 | 36.3 | 36.3 |
| 1 | 3 | 10 | 21.6 | 22.2 | 27.8 | 32.6 | 35.6 | 35.9 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |
| 2 | 3 | 10 | 19.1 | 21.8 | 22.0 | 22.5 | 26.1 | 34.1 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |
| 3 | 3 | 10 | 16.9 | 21.8 | 22.0 | 22.0 | 22.1 | 31.5 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0 |

Anexo D

Parametros conservativos del cultivo de papa precargados en el modelo AquaCrop

| Valor | Descripción |
|-------|---|
| 7 | Temperatura base (° C) |
| 35 | Temperatura superior (° C) |
| 2349 | Longitud total del ciclo del cultivo en crecimiento grados- día |
| 0.2 | Factor de agotamiento del agua en el suelo para la expansión del dosel (p- exp) - Umbral superior |
| 0.6 | Factor de agotamiento del agua en el suelo para la expansión del dosel (p- exp) - Umbral inferior |
| 3 | Factor de formación de coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel (0.0 = línea recta) |
| 0.55 | Fracción de agotamiento del agua para control de estomas (p - sto) - Umbral superior |
| 3 | Factor de forma de coeficiente de estrés hídrico para el control de los estomas (0.0 = línea recta) |
| 0.7 | Factor de agotamiento del agua en el suelo por la senescencia del follaje (p - sen) - Umbral superior |
| 3 | Factor de forma de coeficiente de estrés hídrico durante la senescencia del follaje (0.0 = línea recta) |
| 0 | Sum (ETo) durante el período de estrés de ser superado antes de la senescencia se dispara |
| 0.8 | Factor de agotamiento del agua en el suelo para la polinización (p - pol) - Umbral superior |
| 5 | Vol% para el punto anaeróbicas (* (SAT - [vol %]) en el que se produce la aireación deficiente *) |
| 50 | Estrés de fertilidad del suelo en la calibración (%) |
| -9 | Frío (temperatura del aire) el estrés que afecta a la polinización - no se considera |
| -9 | El calor (temperatura del aire) el estrés que afecta a la polinización - no se considera |

| | |
|--------|---|
| 7 | Grados de crecimiento mínimos requeridos para la producción total de biomasa (° C - día) |
| 1.1 | Coeficiente del cultivo cuando dosel es completa, pero antes de la senescencia (Kcb |
| 0.15 | Disminución del coeficiente de cultivo (% / día) como resultado del envejecimiento |
| 0.3 | Profundidad radicular efectiva mínima (m) |
| 1.5 | La profundidad máxima efectiva de las raíces (m) |
| 15 | Factor de forma que describe la expansión de zona raíz |
| 0.016 | Extracción máxima del agua de la raíz (m ³ water/m ³ soil.day) en la parte superior de la zona de la raíz trimestre |
| 0.004 | Extracción máxima del agua de la raíz (m ³ water/m ³ soil.day) en el trimestre final de zona de la raíz |
| 60 | Efecto de la cobertura del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final de la temporada |
| 10 | Superficie del suelo cubierta por una plántula individual en 90 % de emergencia (cm ²) |
| 45000 | Número de plantas por hectárea |
| 0.3151 | Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) : Aumento de la cobertura del dosel (cubierta fracción de suelo por día) |
| 2 | Disminución máxima de dosel Crecimiento Coeficiente dentro y entre temporadas - No es aplicable |
| -9 | Número de temporadas en la que se alcanza una disminución máxima de dosel Crecimiento Coeficiente - No es aplicable |
| -9 | Factor de forma de disminución de crecimiento de dosel Coeficiente - No es aplicable |
| -9 | Cubierta de copas máxima (CCX) en la cobertura del suelo |
| 0.95 | fracción |
| 0.0265 | Coeficiente de disminución de dosel (CDC) : Disminución de la cubierta de copas (en la fracción por día) |
| 5 | |
| 18 | Días naturales : desde la siembra hasta la aparición |

| | |
|------|---|
| 35 | Días naturales : desde la siembra hasta la máxima profundidad de enraizamiento |
| 152 | Días naturales : desde la siembra hasta comenzar la senescencia |
| 168 | Días naturales : desde la siembra hasta la madurez (longitud de ciclo de cultivo) |
| 46 | Días naturales : desde la siembra hasta el inicio de la formación de rendimiento |
| 0 | Duración de la etapa de floración (días) |
| 0 | Determinación del cultivo desvinculado con la floración |
| 121 | Edificio de Índice de Cosecha a partir de la ampliación de la raíz / tubérculo (días) |
| 18 | Productividad del Agua normalizó para ETo y CO2 (GT *) (gram/m2) |
| 100 | Productividad del Agua normalizó para ETo y CO2 durante la formación de rendimiento (en% WP *) |
| 75 | Índice de referencia de la cosecha (Hio) (%) |
| 2 | Posible aumento (%) de HI debido a la escasez de agua antes del inicio de la formación de rendimiento |
| -9 | Sin impacto en HI de crecimiento vegetativo restringida durante la formación del rendimiento |
| 10 | Coeficiente de describir el impacto negativo en HI de cierre de los estomas durante la formación de rendimiento |
| 5 | Incremento máximo permitido (%) del especificado HI |
| 368 | GDDays : desde la siembra hasta la emergencia |
| 678 | GDDays : desde la siembra hasta la máxima profundidad de enraizamiento |
| 2157 | GDDays : desde la siembra para iniciar la senescencia |
| 2349 | GDDays : desde la siembra hasta la madurez (la longitud del ciclo de cultivo) |
| 852 | GDDays : desde la siembra para iniciar la formación de tubérculos |

| | |
|--------|---|
| 0 | Duración de la floración (creciente grados-día) |
| 0.0174 | CGC para GGDays : Aumento de la cobertura del dosel (en fracción de la |
| 68 | cobertura del suelo por día creciente grado) |
| 0.002 | CDC para GGDays : Disminución de la cubierta de copas (en la |
| | fracción por día creciente grado) |
| 1466 | GDDays : Edificio plano de índice de cosecha durante la formación |
| | del rendimiento |

Anexo E

Parámetros conservativos del cultivo de frijol precargados en el modelo AquaCrop

| Valor | Descripción |
|-------|---|
| 5 | Temperatura base (° C) |
| 30 | Temperatura superior (° C) |
| 2700 | Longitud del ciclo del cultivo en crecimiento grados- día |
| 0.15 | Factor de agotamiento del agua para la expansión del dosel (p- exp) - Umbral superior |
| 0.65 | Factor de agotamiento del agua en el suelo para la expansión del dosel (p- exp) - Umbral inferior |
| 3 | Factor de formación de coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel (0.0 = línea recta) |
| 0.5 | Fracción de agotamiento del agua en el suelo para el control de los estomas (p - sto) - Umbral superior |
| 3 | Factor de forma de coeficiente de estrés hídrico para el control de los estomas (0.0 = línea recta) |
| 0.7 | Factor de agotamiento del agua en el suelo por la senescencia del follaje (p - sen) - Umbral superior |
| 3 | Factor de forma de coeficiente de estrés hídrico durante la senescencia del follaje (0.0 = línea recta) |
| 0 | Sum (ETo) durante el período de estrés de ser superado antes de la senescencia se dispara |
| 0.85 | Factor de agotamiento del agua en el suelo para la polinización (p - pol) - Umbral superior |
| 5 | Vol% para el punto anaeróbicas (* (SAT - [vol %]) en el que se produce la aireación deficiente *) |
| 50 | Estrés de fertilidad del suelo en la calibración (%) |
| 8 | Frío (temperatura del aire) el estrés que afecta a la polinización - no se considera |
| 40 | El calor (temperatura del aire) el estrés que afecta a la polinización - no se considera |

| | |
|------|---|
| 10 | Grados de crecimiento mínimos requeridos para la producción total de biomasa (° C - día) |
| 1.1 | Coeficiente del cultivo cuando dosel es completa, pero antes de la senescencia (Kcb |
| 0.3 | Disminución del coeficiente de cultivo (% / día) como resultado del envejecimiento |
| 0.3 | Profundidad radicular efectiva mínima (m) |
| 2 | La profundidad máxima efectiva de las raíces (m) |
| 15 | Factor de forma que describe la expansión de zona raíz |
| 0.01 | Extracción máxima del agua de la raíz (m ³ water/m ³ soil.day) en la parte superior de la zona de la raíz trimestre |
| 2 | |
| 0.00 | Extracción máxima del agua de la raíz (m ³ water/m ³ soil.day) en el trimestre final de zona de la raíz |
| 3 | |
| 25 | Efecto de la cobertura del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final de la temporada |
| 5 | Superficie del suelo cubierta por una plántula individual en 90 % de emergencia (cm ²) |
| 3300 | |
| 00 | Número de plantas por hectárea |
| 0.10 | Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) : Aumento de la cobertura del dosel (cubierta fracción de suelo por día) |
| 569 | |
| -9 | Disminución máxima de dosel Crecimiento Coeficiente dentro y entre temporadas - No es aplicable |
| -9 | Número de temporadas en la que se alcanza una disminución máxima de dosel Crecimiento Coeficiente - No es aplicable |
| -9 | Factor de forma de disminución de crecimiento de dosel Coeficiente - No es aplicable |
| 0.98 | Cubierta de copas máxima (CCX) en la cobertura del suelo fracción |
| 0.02 | Coeficiente de disminución de dosel (CDC) : Disminución de la cubierta de copas (en la fracción por día) |
| 885 | |

| | |
|------|---|
| 9 | Días naturales : desde la siembra hasta la aparición |
| 92 | Días naturales : desde la siembra hasta la máxima profundidad de enraizamiento |
| 104 | Días naturales : desde la siembra hasta comenzar la senescencia |
| 130 | Días naturales : desde la siembra hasta la madurez (longitud de ciclo de cultivo) |
| 71 | Días naturales : desde la siembra hasta el inicio de la formación de rendimiento |
| 29 | Duración de la etapa de floración (días) |
| 1 | Determinación del cultivo desvinculado con la floración |
| 59 | Edificio de Índice de Cosecha a partir de la ampliación de la raíz / tubérculo (días) |
| 14 | Productividad del Agua normalizó para ETo y CO2 (GT *) (gram/m2) |
| 60 | Productividad del Agua normalizó para ETo y CO2 durante la formación de rendimiento (en% WP *) |
| 40 | Índice de referencia de la cosecha (Hio) (%) |
| 3 | Posible aumento (%) de HI debido a la escasez de agua antes del inicio de la formación de rendimiento |
| -9 | Sin impacto en HI de crecimiento vegetativo restringida durante la formación del rendimiento |
| 3 | Coeficiente de describir el impacto negativo en HI de cierre de los estomas durante la formación de rendimiento |
| 10 | Incremento máximo permitido (%) del especificado HI |
| 200 | GDDays : desde la siembra hasta la emergencia |
| 1934 | GDDays : desde la siembra hasta la máxima profundidad de enraizamiento |
| 2200 | GDDays : desde la siembra para iniciar la senescencia |
| 2700 | GDDays : desde la siembra hasta la madurez (la longitud del ciclo de cultivo) |
| 1500 | GDDays : desde la siembra para iniciar la formación de tubérculos |

| | |
|------|---|
| 600 | Duración de la floración (creciente grados-día) |
| 0.00 | CGC para GGDays : Aumento de la cobertura del dosel (en fracción de la |
| 5 | cobertura del suelo por día creciente grado) |
| 0.00 | CDC para GGDays : Disminución de la cubierta de copas (en la |
| 15 | fracción por día creciente grado) |
| | GDDays : Edificio plano de índice de cosecha durante la formación |
| 1180 | del rendimiento |

Anexo F

Requerimientos hídricos y desarrollo productivo según diferentes fechas de siembra y modalidad de riego para el cultivo de frijol y papa

Anexo F-1

Requerimientos hídricos de frijol y desarrollo productivo según fecha de siembra bajo riego por goteo.

| Fecha de siembra | Biomasa ton ha ⁻¹ | Cosecha ton ha ⁻¹ | Ciclo cultivo | Lamina neta mm ³ | Lamina Bruta mm ³ |
|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|
| 01-oct | 8.55 | 3.06 | 01oct-15ene | 253.3 | 271.03 |
| 10-oct | 8.657 | 3.03 | 10oct-29ene | 256.7 | 274.66 |
| 20-oct | 9.40 | 3.34 | 20oct-15feb | 213.5 | 228.44 |
| 30-oct | 9.72 | 3.43 | 30 oct-2mar | 218.3 | 233.58 |
| 01-nov | 9.59 | 3.36 | 1nov-04mar | 223.8 | 239.46 |
| 10-nov | 9.65 | 3.4 | 10nov-16mar | 261.4 | 279.69 |
| 20-nov | 9.27 | 2.32 | 20nov-27mar | 314 | 335.98 |
| 30-nov | 9.25 | 3.25 | 30nov-5 abril | 324.8 | 340.53 |

Anexo F-2

Requerimientos hídricos del frijol y desarrollo productivo según fecha de siembra bajo riego por gravedad.

| Fecha de siembra | Biomasa ton ha ⁻¹ | Cosecha ton ha ⁻¹ | Ciclo cultivo | Lamina neta mm ³ | Lamina Bruta mm ³ |
|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|
| 01-oct | 7.1 | 2.3 | 01oct-15ene | 253.3 | 341.95 |
| 10-oct | 7.38 | 2.49 | 10oct-29ene | 256.7 | 346.54 |
| 20-oct | 8.06 | 2.77 | 20oct-15feb | 213.5 | 288.22 |
| 30-oct | 7.90 | 2.75 | 30oct-02mar | 218.3 | 294.7 |
| 01-nov | 7.76 | 2.71 | 01nov-04mar | 223.8 | 302.13 |
| 10-nov | 6.99 | 2.44 | 10nov-16mar | 261.4 | 352.89 |
| 20-nov | 5.94 | 2.05 | 30nov-5abril | 314.0 | 423.9 |
| 30-nov | 5.33 | 1.82 | 30nov-05abril | 324.8 | 438.48 |

Anexo F-3

Requerimientos hídricos de papa y desarrollo productivo según fecha de siembra bajo riego por goteo.

| Fecha de Siembra | Biomasa ton ha⁻¹ | Cosecha ton ha⁻¹ | Ciclo cultivo | Lamina neta mm³ | Lamina Bruta mm³ |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 01-oct | 14.03 | 12.34 | 01oct-09ene | 314.9 | 336.94 |
| 10-oct | 14.55 | 12.79 | 10oct-23ene | 321.5 | 344.01 |
| 20-oct | 15.78 | 13.91 | 20oct-10feb | 321.4 | 343.90 |
| 30-oct | 15.83 | 13.93 | 30oct-24feb | 336.3 | 359.84 |
| 01-nov | 15.95 | 14.04 | 01nov-27feb | 341.6 | 365.51 |
| 10-nov | 16.13 | 14.16 | 10nov-11mar | 372 | 398.04 |
| 20-nov | 16.28 | 14.37 | 20nov-23mar | 407.6 | 436.13 |
| 30-nov | 16.04 | 14.14 | 30nov-01abril | 435.7 | 466.20 |

Anexo F-4

Requerimientos hídricos de papa y desarrollo productivo según fecha de siembra bajo riego por gravedad.

| Fecha de siembra | Biomasa ton ha⁻¹ | Cosecha ton ha⁻¹ | Días a cosecha | Lamina neta mm³ | Lamina Bruta mm³ |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 01-oct | 12.6 | 10.64 | 01oct-09ene | 314.9 | 425.115 |
| 10-oct | 12.73 | 10.82 | 10oct-23ene | 321.5 | 434.025 |
| 20-oct | 14.3 | 12.15 | 20oct-10feb | 321.4 | 433.89 |
| 30-oct | 14.9 | 12.63 | 30oct-24feb | 336.3 | 454.005 |
| 01-nov | 15.08 | 12.81 | 01nov27feb | 341.6 | 461.16 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|--------------|-------|---------|
| 10-nov | 15.36 | 13.03 | 10nov11mar | 372 | 502.2 |
| 20-nov | 15.04 | 12.72 | 20nov23mar | 407.6 | 550.26 |
| 30-nov | 14.36 | 12.07 | 30nov-1abril | 435.7 | 588.195 |

Anexo G

Muestreos foliares realizados al cultivo de frijol y papa

Anexo G-1

Muestreos foliares realizados al cultivo de frijol.

| Muestreo | Fecha | PSH (g·m ⁻²) | PST (g·m ⁻²) | PSR (g·m ⁻²) | PSV (g·m ⁻²) | Total (g·m ⁻²) |
|----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 4/12/2010 | 35 | 2.5 | 2.5 | - | 40 |
| 2 | 17/12/2010 | 176.6 | 38.5 | 15 | - | 230.1 |
| 3 | 31/12/2010 | 177 | 41.2 | 17.5 | - | 235.7 |
| 4 | 14/01/2011 | 360 | 103.2 | 22.5 | 7.5 | 493.2 |
| 5 | 28/01/2011 | 436.5 | 200.625 | 35 | 15 | 687.125 |

Anexo G-2

Muestreos foliares realizados al cultivo de papa

| Muestreo | Fecha | PSH+T (g·m ⁻²) | PSR (g·m ⁻²) | PSTuberculo (g·m ⁻²) | Total (g·m ⁻²) |
|----------|------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 17/12/2010 | 194.6 | 165.0 | - | 359.6 |
| 2 | 31/12/2010 | 323.0 | 239.5 | 563.5 | 1126 |
| 3 | 18/01/2011 | 680.4 | 22.0 | 1982.4 | 2684.8 |
| 4 | 29/01/2011 | 566.4 | 51.0 | 2157.8 | 2775.2 |
| 5 | 15/02/2011 | 479.2 | 48.0 | 1921.9 | 2449.1 |
| 6 | 23/02/2011 | 263.1 | 53.7 | 2338.0 | 2654.8 |

Psh+T; peso seco de hoja mas tallo. Psr; peso seco raíz. Ps; peso seco