



**Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019**

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.
Asociación Estatal de Asociaciones de Usuarios de Riego
Productores Agrícolas del Estado de Sinaloa S.C.



“Enseñar la explotación de la
Tierra no la del hombre”



SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE PAPA MEDIANTE EL USO DEL MODELO “SIMPLE” EN MOCHIS, SINALOA

JIMÉNEZ-AYALA, JOSÉ ALBERTO¹; RUÍZ-GARCÍA, AGUSTÍN¹

Fecha de presentación **19/septiembre/2019**
Mazatlán, Sinaloa, México





Contenido

- Introducción
- Métodos y Materiales
- Resultados y Discusión
- Conclusiones



Introducción

De acuerdo con la FAO (2008) el cultivo de la papa es importante por varias razones:

- Es idónea para producirse donde la tierra es limitada y la mano de obra abundante, condiciones que caracterizan a una gran parte del mundo en desarrollo.
- La papa es un alimento más nutritivo que se produce en menos tiempo, con menos tierra y en climas más difíciles que cualquier otro cultivo importante como maíz.
- Hasta un 85% de la planta es comestible para las personas, en comparación con el 50% en el caso de los cereales.



Figura 1. Composición nutricional de la papa (FAO,2008).



Introducción

En el año 2017 en México se produjeron 1 715 499 toneladas y en el estado de Sinaloa 332 101 toneladas siendo el 2do estado con mayor aporte a la producción nacional (SIAP, 2018).

Volumen de producción de principales entidades productoras de papa

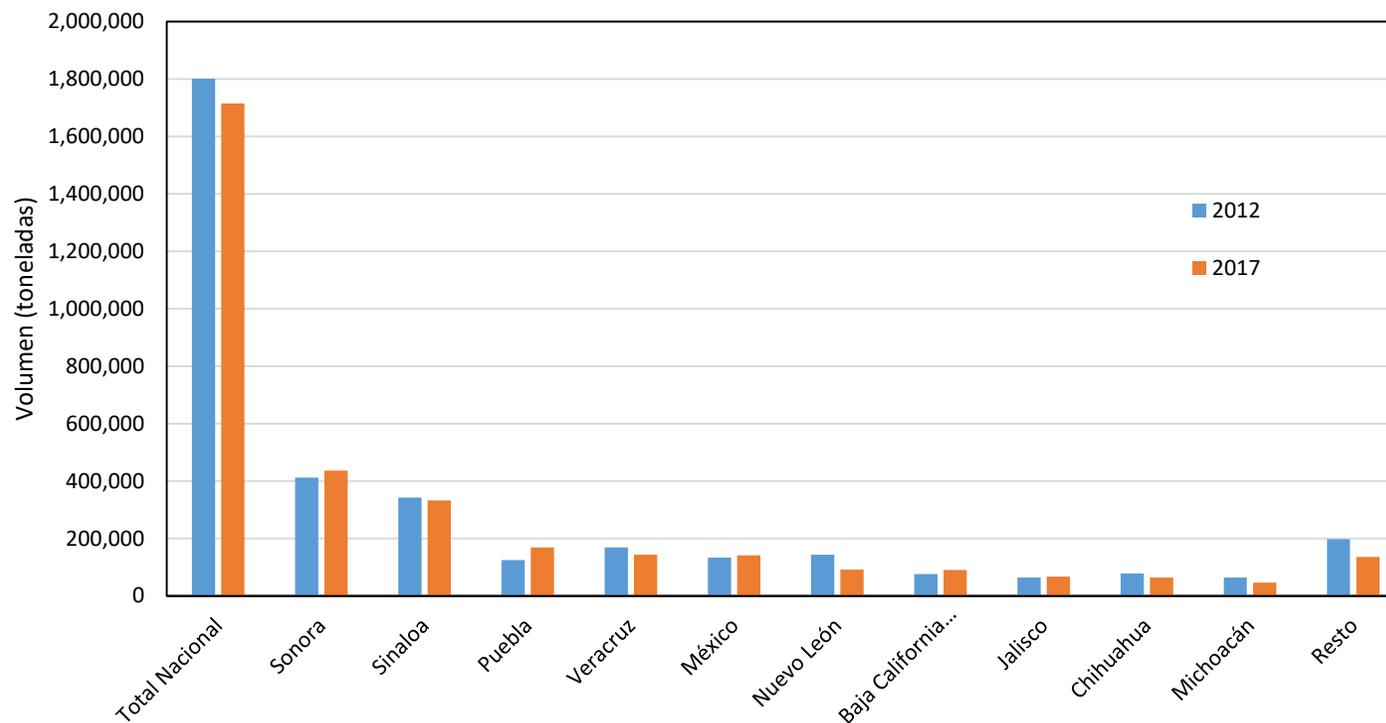


Figura 2. Volumen de producción de principales entidades productoras de papa (SIAP, 2018).





Introducción

Existen varios modelos de simulación biológica para papa que determinan los °D, las fases fenológicas y el rendimiento.

Modelos más usados: DSSAT (Hoogenboom et al., 2012; Jones et al., 2003), LINTUL (Kooman P. L. and Haverkort A. J. 1995), AquaCrop (Raes et al., 2009), SUBSTOR (Ritchie et al., 1995) y SIMPOTATO (Hodges et al., 1992). Estos modelos son complejos y requieren muchos datos de entrada que no están fácilmente disponibles para una región agrícola.

SIMPLE es un **modelo de cultivo genérico** fácilmente modificable que simula el crecimiento, desarrollo y rendimiento. Tiene 13 parámetros, nueve para características de la especie y cuatro de la variedad. Las entradas que requiere el modelo incluyen datos diarios del clima, manejo de cultivo y parámetros de retención de agua del suelo. El modelo fue calibrado extensivamente con los cultivos de la base de datos del DSSAT (Zhao et al., 2019). La situación de producción del modelo de acuerdo con Rabbinge, (1993) es alcanzable, esto quiere decir que el modelo además de considerar efectos de radiación y temperatura toma en cuenta el efecto debido a el agua disponible, sin considerar: efectos por contenido de nitrógeno, fosforo y efectos por la aparición de malezas, plagas y enfermedades.



Materiales y métodos

La investigación se realizó con los datos de un experimento en el ciclo agrícola (O-I) 2008-2009 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF).

- Coordenadas geográficas de 25° 48.89' N, 109° 1.53' O, altitud de 20 msnm.
- Cultivo: papa; Variedad: Alpha; Fecha de siembra: 31 de octubre de 2008; Fecha de cosecha: 27 de febrero de 2009.
- Sistema de riego: goteo
- Muestreo: 6 de materia seca distribuidos en el ciclo de cultivo.
- Datos meteorológicos: de la estación ubicada en los módulos de riego Santa Rosa y Taxtes.

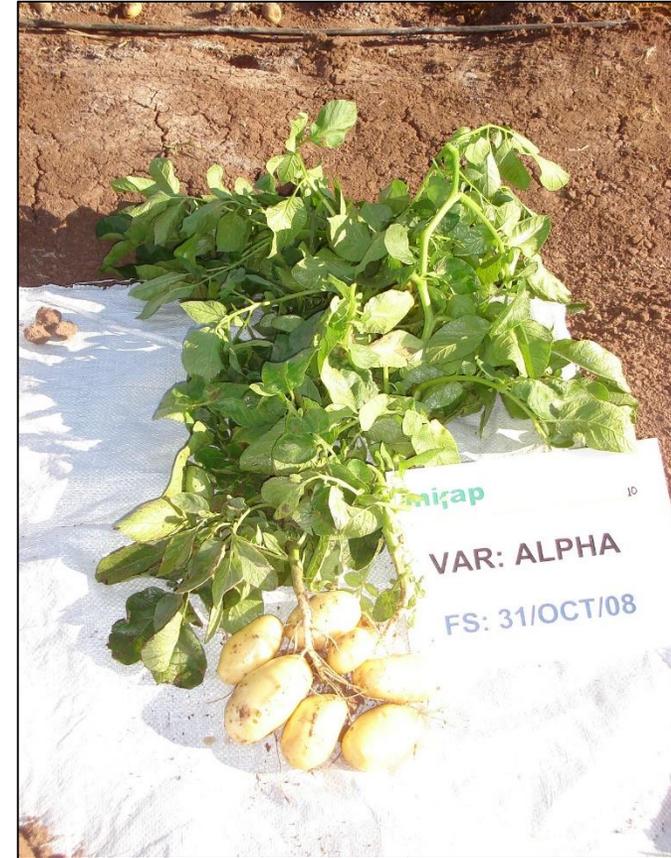


Figura 3. Muestreo 4 para Alpha (Sifuentes-Ibarra, comunicación personal).



Materiales y métodos

El modelo se implementó en MATLAB basándose en el programa en lenguaje R proporcionado por el autor.

Variables de entrada:

- Temperatura diaria máxima y mínima, precipitación y radiación solar.
- Concentración atmosférica de CO₂, fecha de siembra/cosecha, riego.

Condiciones iniciales:

- $TT_{i+1} = TT_i + \Delta TT$ (temperatura acumulada) (1)

- $Biomass_cum_{i+1} = Biomass_cum_i + Biomass_rate$ (biomasa) (2)

- $ARID = 1 - \frac{\min(ET_o, 0.096 * PAW)}{ET_o}$ (condición de agua en el suelo) (3)

- $fSolar = \begin{cases} \frac{fSolar_max}{1 + e^{-0.01(TT - I_{50A})}}, & \text{período de crecimiento de la hoja} \\ \frac{fSolar_max}{1 + e^{-0.01(TT - (T_{sum} - I_{50B}))}}, & \text{período de senescencia de la hoja} \end{cases}$ (4)

(fracción de radiación interceptada)





Materiales y métodos

El modelo SIMPLE determina la biomasa a partir de la radiación solar interceptada a través de un simple coeficiente de conversión llamado coeficiente de eficiencia de uso de radiación (RUE).

$$\text{Biomass}_{\text{rate}} = \text{Radiation} * f_{\text{Solar}} * 10 * \text{RUE} * f(\text{CO}_2) * f(\text{Temp}) * \min(f(\text{Heat}), f(\text{Water})) \quad (5)$$

$$\text{Biomass}_{\text{cum}_{i+1}} = \text{Biomass}_{\text{cum}_i} + \text{Biomass}_{\text{rate}} \quad (6)$$

$$\text{Yield} = \text{Biomass}_{\text{cum}_{\text{maturity}}} * \text{HI} \quad (7)$$

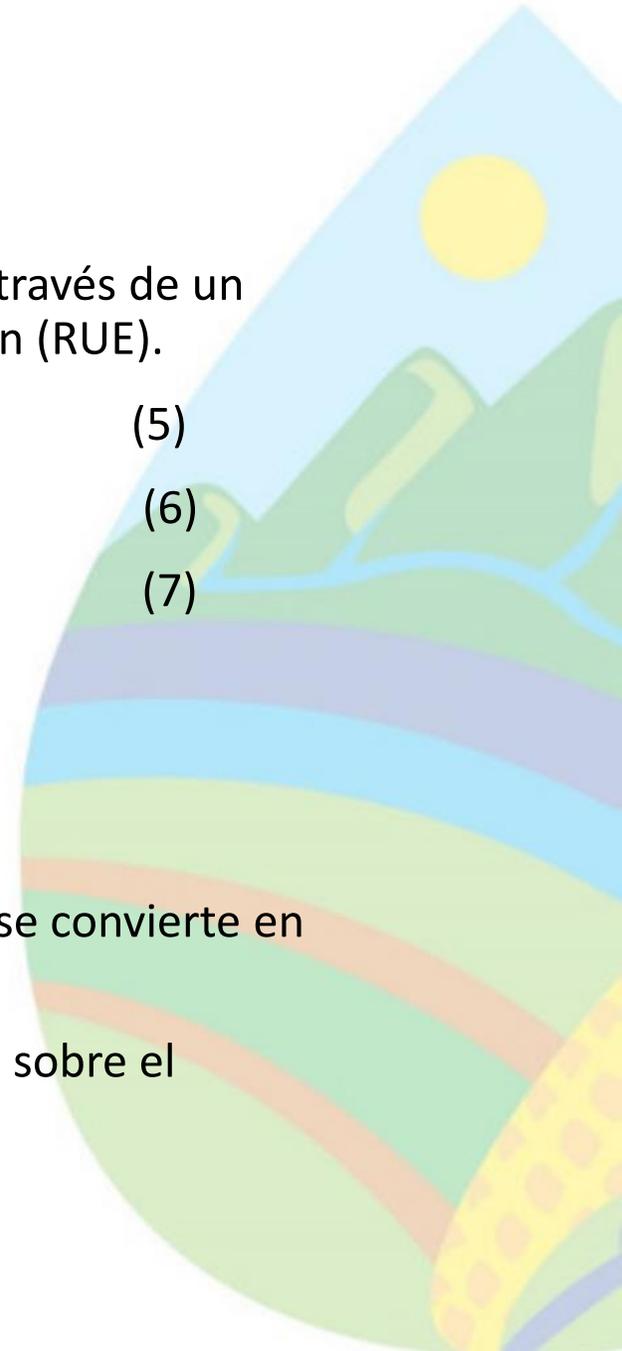
donde:

$\text{Biomass}_{\text{rate}}$ es la tasa diaria de crecimiento de biomasa kg/ha.

f_{Solar} es la fracción de radiación interceptada por el dosel de un cultivo.

RUE es la eficiencia de uso de la radiación (o sea de la radiación interceptada cuanta se convierte en biomasa).

$f(\text{CO}_2) * f(\text{Temp}) * \min(f(\text{Heat}), f(\text{Water}))$ son el estrés e impacto que cada uno tiene sobre el incremento de biomasa.



Materiales y métodos

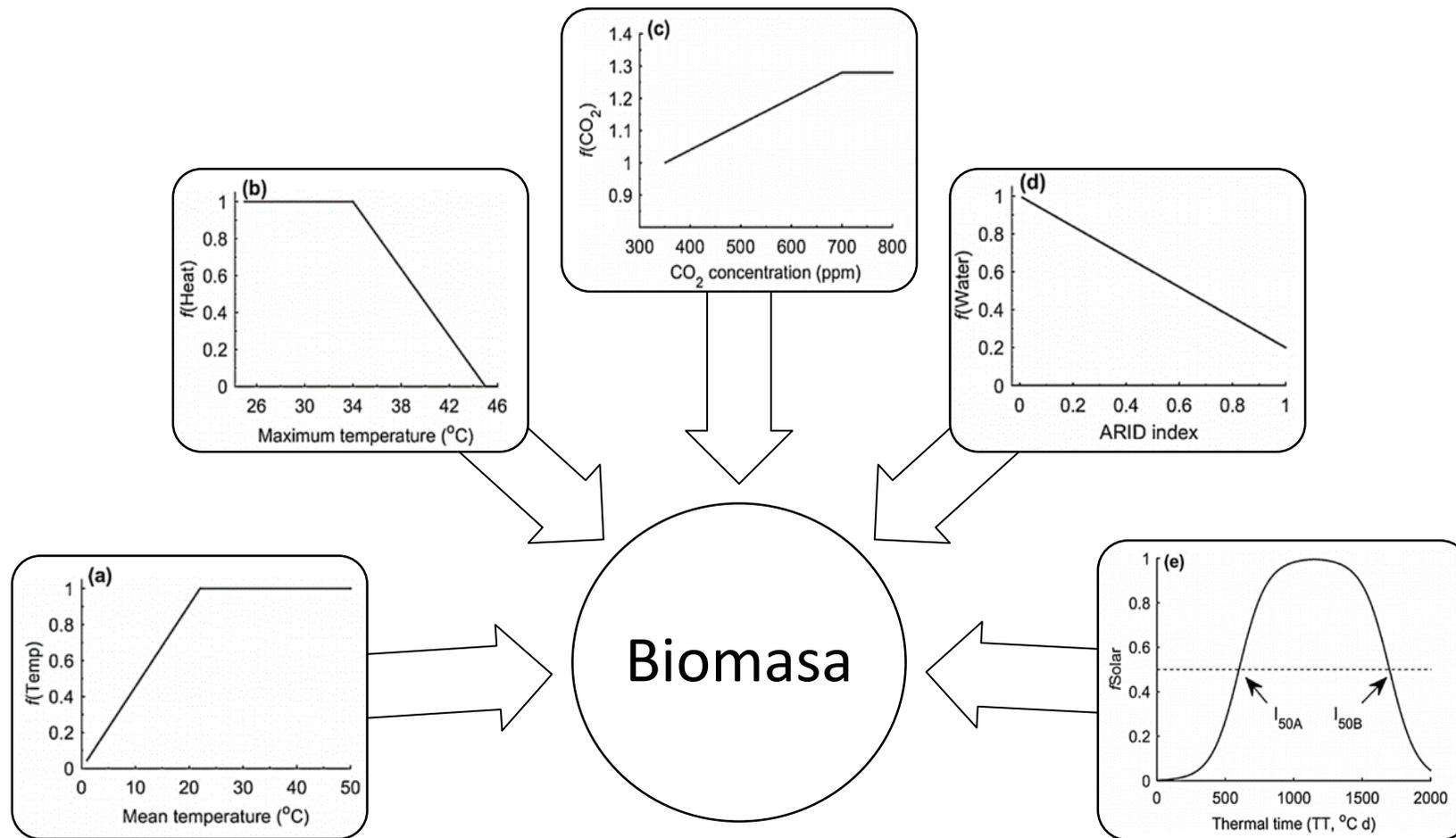


Figura 5. Diagrama conceptual del modelo SIMPLE (Adaptación de Zhao et al., 2019).



Materiales y métodos

Cuadro 1. Valores de los parámetros de especie y variedad usados en el modelo SIMPLE (cuadro traducido de Zhao et al., 2019).

| Cultivo | Variedad | Parámetros de variedad | | | | Parámetros de especie | | | | | | CO ₂ _RUE | S_Water | |
|---------|----------------|------------------------|------|------|------|-----------------------|------|-----|----------|----------|------|----------------------|---------|----------|
| | | Tsum | HI | I50A | I50B | Tbase | Topt | RUE | I50 maxH | I50 maxW | MaxT | | | ExtremeT |
| papa | Sebago | 2300 | 0.82 | 500 | 350 | 4 | 22 | 1.3 | 50 | 30 | 34 | 45 | 0.1 | 0.4 |
| papa | Desiree | 2600 | 0.7 | 690 | 450 | 4 | 22 | 1.3 | 50 | 30 | 34 | 45 | 0.1 | 0.4 |
| papa | Zibaihua | 2500 | 0.45 | 690 | 500 | 4 | 22 | 1.3 | 50 | 30 | 34 | 45 | 0.1 | 0.4 |
| papa | Jinguan | 2400 | 0.45 | 690 | 450 | 4 | 22 | 1.3 | 50 | 30 | 34 | 45 | 0.1 | 0.4 |
| papa | Russet Burbank | 2200 | 0.85 | 500 | 400 | 4 | 22 | 1.3 | 50 | 30 | 34 | 45 | 0.1 | 0.4 |
| papa | Hilite Russet | 2200 | 0.85 | 480 | 450 | 4 | 22 | 1.3 | 50 | 30 | 34 | 45 | 0.1 | 0.4 |

Donde:

Tsum: Temperatura acumulada requerida desde la siembra hasta madurez (°C d).

HI: Índice de cosecha.

I50A: Temperatura requerida para desarrollar el área de la hoja para interceptar el 50% de la radiación (°C d).

I50B: Temperatura requerida para alcanzar el 50% de la radiación interceptada durante la senescencia del dosel (°C d).

Tbase: Temperatura base (°C).

Topt: Temperatura optima (°C).

RUE: Eficiencia de uso de la radiación (gMJ⁻¹ m⁻²).

I50maxH: Máxima reducción diaria en I50B debido al estrés por calor (°C d).

I50maxW: Máxima reducción diaria en I50B debido al estrés por agua (°C d).

Tmax: Umbral de temperatura máxima para empezar a acelerar a senescencia (°C).

Text: Umbral de temperatura extrema cuando RUE se convierte en 0 (°C).

CO₂: Incremento relativo en RUE por ppm debido al incremento de CO₂ por encima de 350 ppm.

Swater: Sensibilidad de RUE debido al estrés por sequía (adimensional).



Materiales y métodos

Se simuló el cultivo de papa usando los datos climáticos del experimento en Mochis y los parámetros propuestos en el artículo de Zhao et al., (2019) para las seis variedades, comparando la cantidad de biomasa acumulada (kg/ha) con la obtenida experimentalmente para 'Alpha'. Los parámetros del suelo que se usaron se obtuvieron de información proporcionada y analizada AWC= 0.15; DDC=0.5; RCN=89 y RDZ=1200.

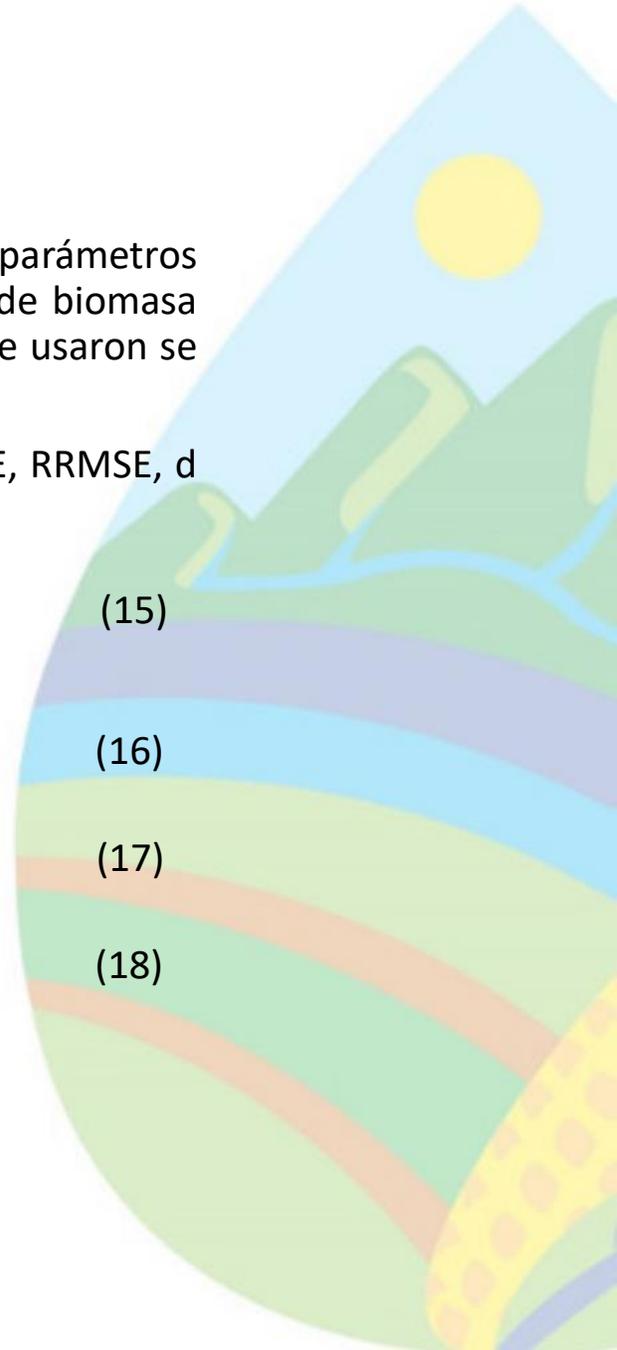
La calibración de los parámetros se realizó manualmente utilizando los estadísticos siguientes: RMSE, RRMSE, d y NSE.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \text{ (Raíz cuadrada del cuadrado medio del error)} \quad (15)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \text{ (Raíz cuadrada relativa del cuadrado medio del error)} \quad (16)$$

- $d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$ Índice de concordancia de Willmott (1982) (17)

- $\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$ Eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (18)



Resultados y Discusión

El comportamiento de las funciones de estrés para todas las variedades reportadas por Zhao et al., fue el mismo con excepción en la función fsolar, esto debido a que solo se variaron los parámetros de variedad (Figura 7.)

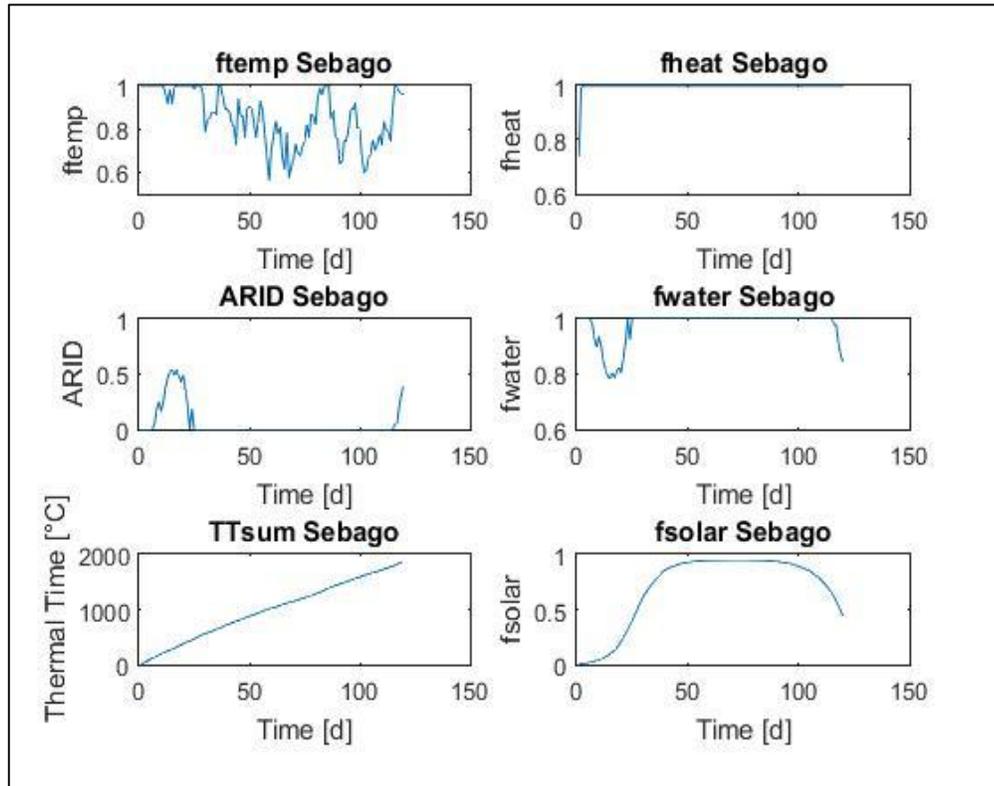


Figura 6. Comportamiento del modelo usando los parámetros de la variedad 'Sebago' para Mochis, Sinaloa.

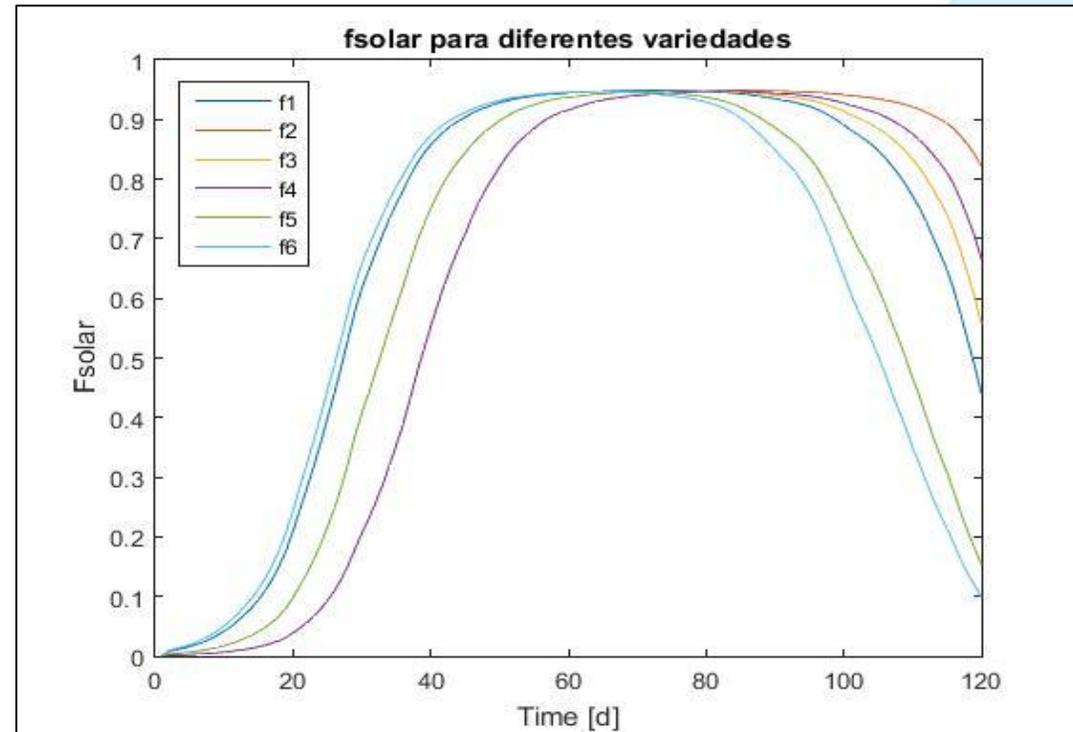


Figura 7. Función fsolar para cada una de las variedades en Mochis, Sinaloa: f1(Sebago), f2(Desiree), f3(Zibaihua), f4(Jingua), f5(Russet Burbank) y f6(Hilite Russet).

Resultados y Discusión

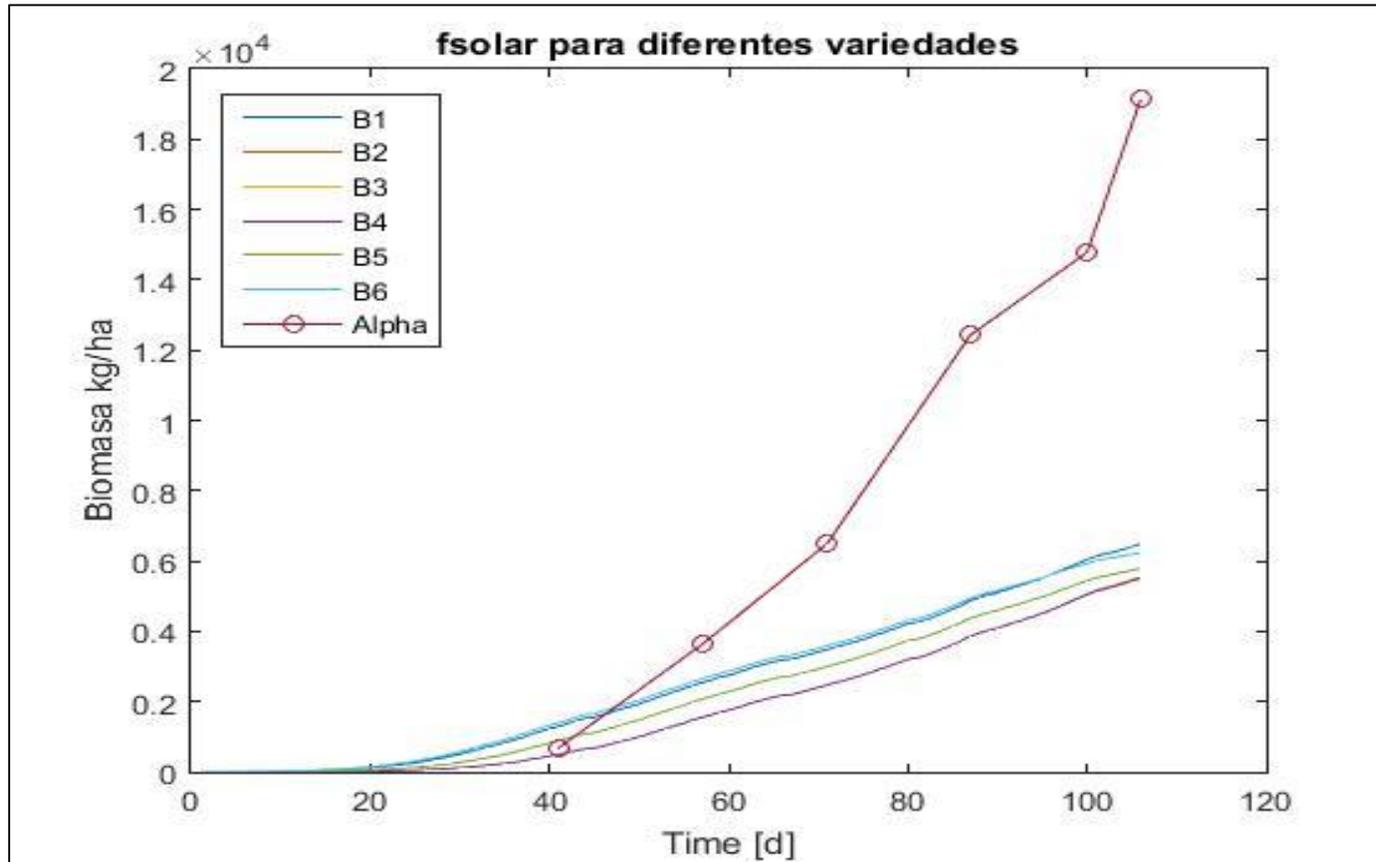


Figura 8. Biomasa acumulada al día 106 para cada una de las variedades: B1 (Sebago), B2 (Desiree), B3 (Zibaihua), B4 (Jingua), B5 (Russet Burbank), B6 (Hilite Russet) y 'Alpha' (Real).





Resultados y Discusión

El primer parámetro a calibrar fue RUE, se comparó la radiación incidente del experimento para la variedad Sebago siendo este el único con días julianos semejantes resultando que la radiación fue en promedio 3 veces más que la se presentó Alpha en el tiempo analizado por lo que se multiplicó el parámetro RUE reportado por este factor teniendo un RUE inicial para Alpha de 3.9.

El lugar del experimento en el que se uso Sebago fue en Canberra, Australia con coordenadas: latitud $35^{\circ} 00'$ S, y longitud $145^{\circ} 00'$ E y para el de Alpha en Mochis, Sinaloa con coordenadas: $25^{\circ} 48'$ N, $109^{\circ} 1.5'$ O.

Radiación experimento Sebago 1970 vs exp. Alpha 2008

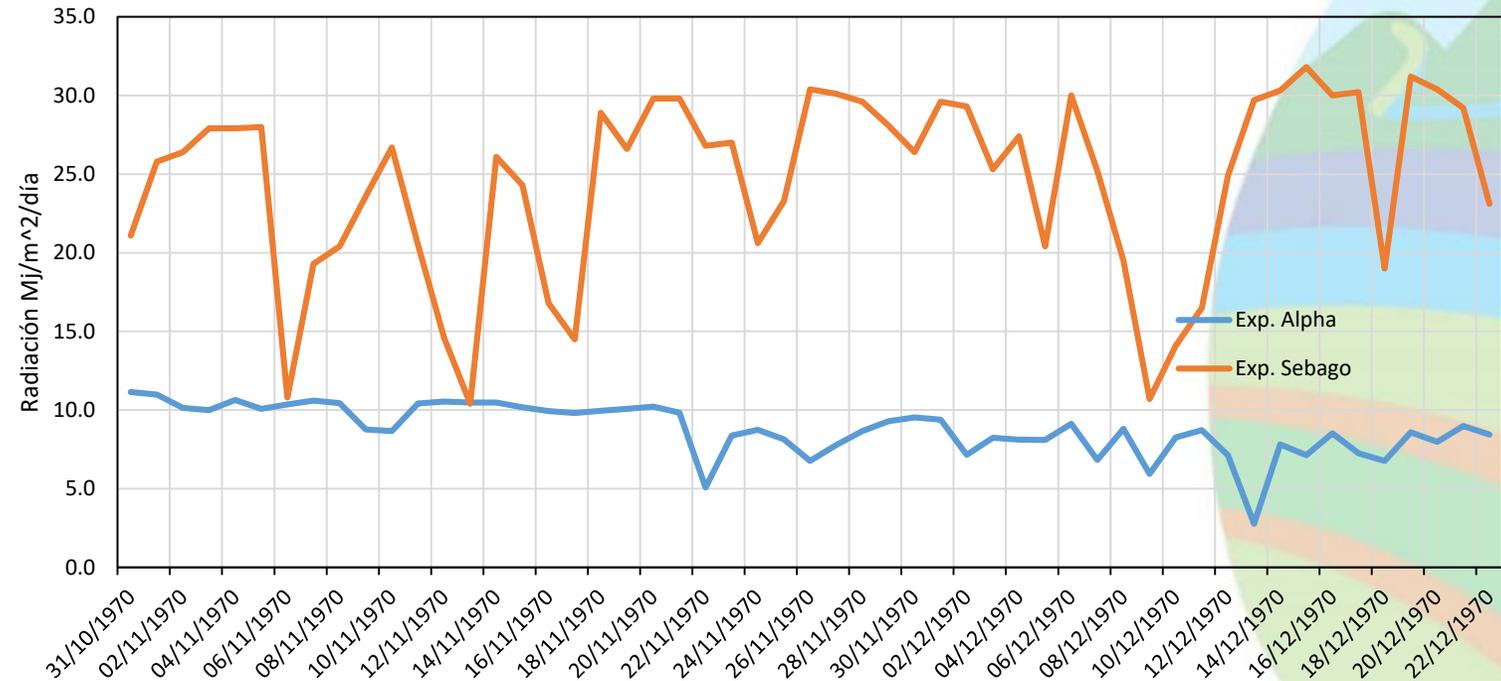


Figura 9. Radiación incidente para el mismo día juliano en dos distintos lugares y años.



Resultados y Discusión

La calibración se **realizó manualmente considerando minimizar el RMSE**, dando como resultado los parámetros del Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de los parámetros calibrados para Alpha.

| Parámetros | Valor |
|-------------|-------|
| Tsum (°C d) | 1760 |
| HI | 0.81 |
| I50A (°C d) | 700 |
| I50B (°C d) | 200 |
| Tbase (°C) | 5.0 |
| Topt (°C) | 20.5 |
| RUE | 4.8 |

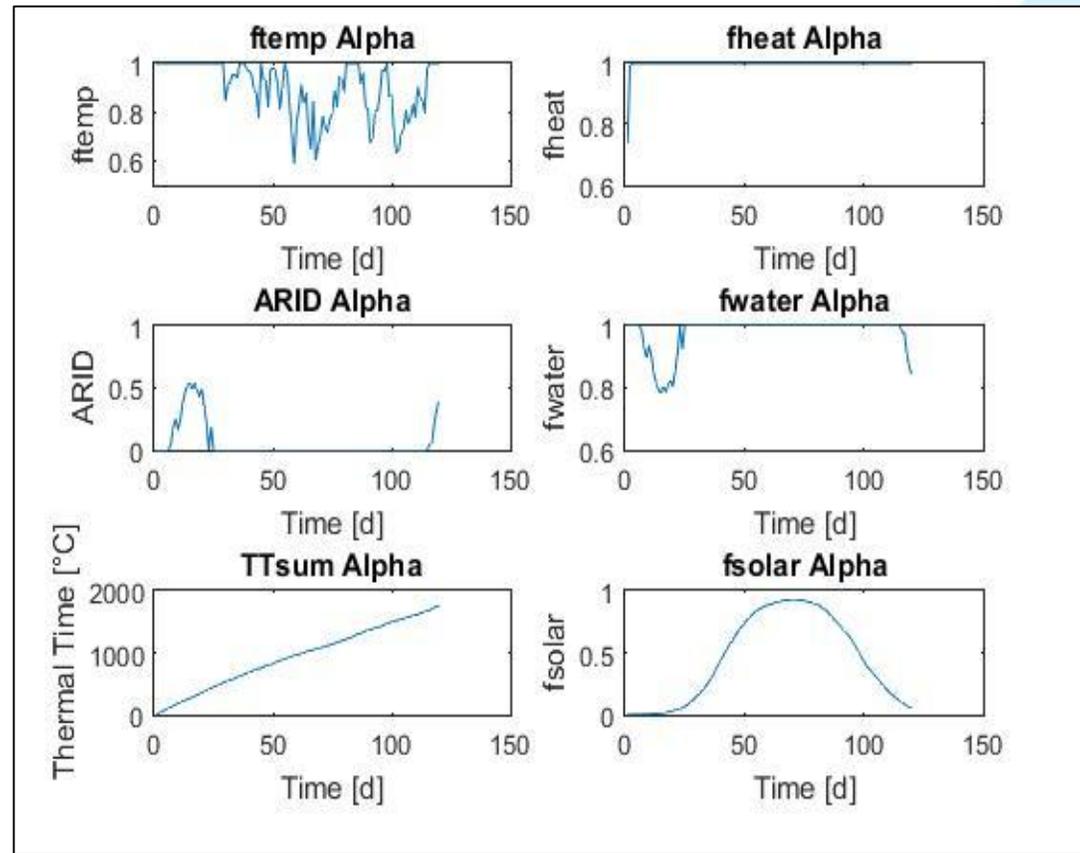


Figura 10. Comportamiento del modelo usando los parámetros calibrados para 'Alpha'.

Resultados y Discusión

De acuerdo con los estadísticos de prueba: RMSE (1.05 ton/ha), RRMSE (11.08%), d (0.986) y NSE (0.973), indican un buen ajuste del modelo.

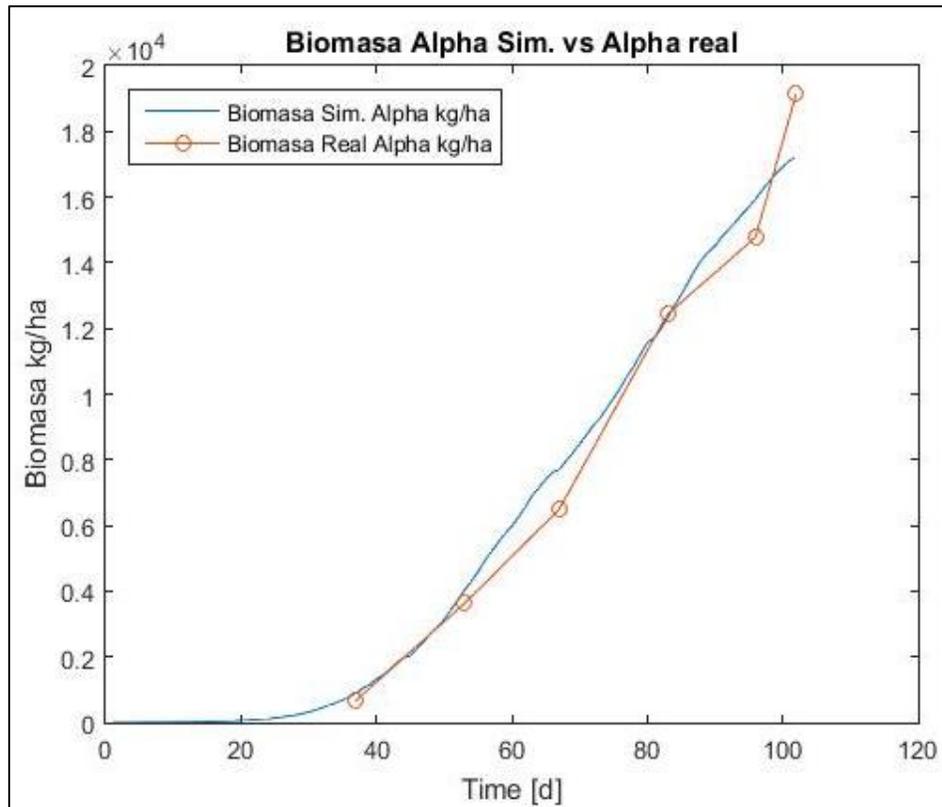


Figura 11. Simulación de biomasa acumulada para Alpha con parámetros calibrados vs observada.

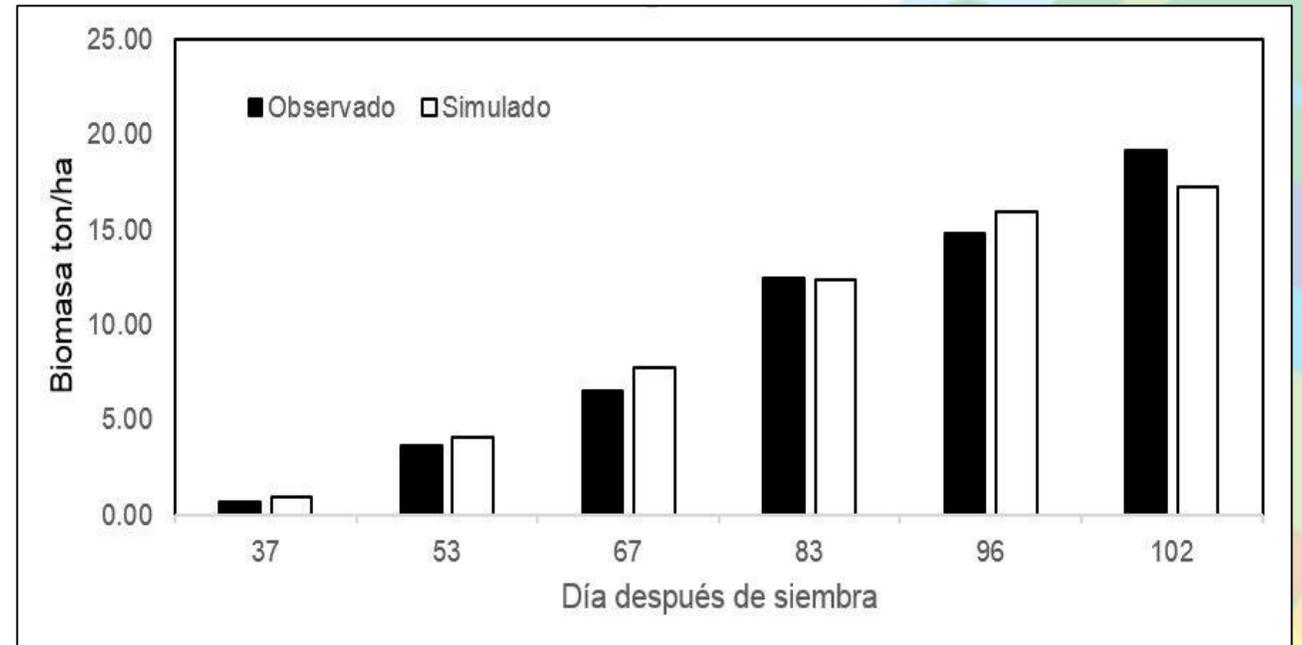


Figura 12. Biomasa simulada y observada de Alpha.



Conclusiones

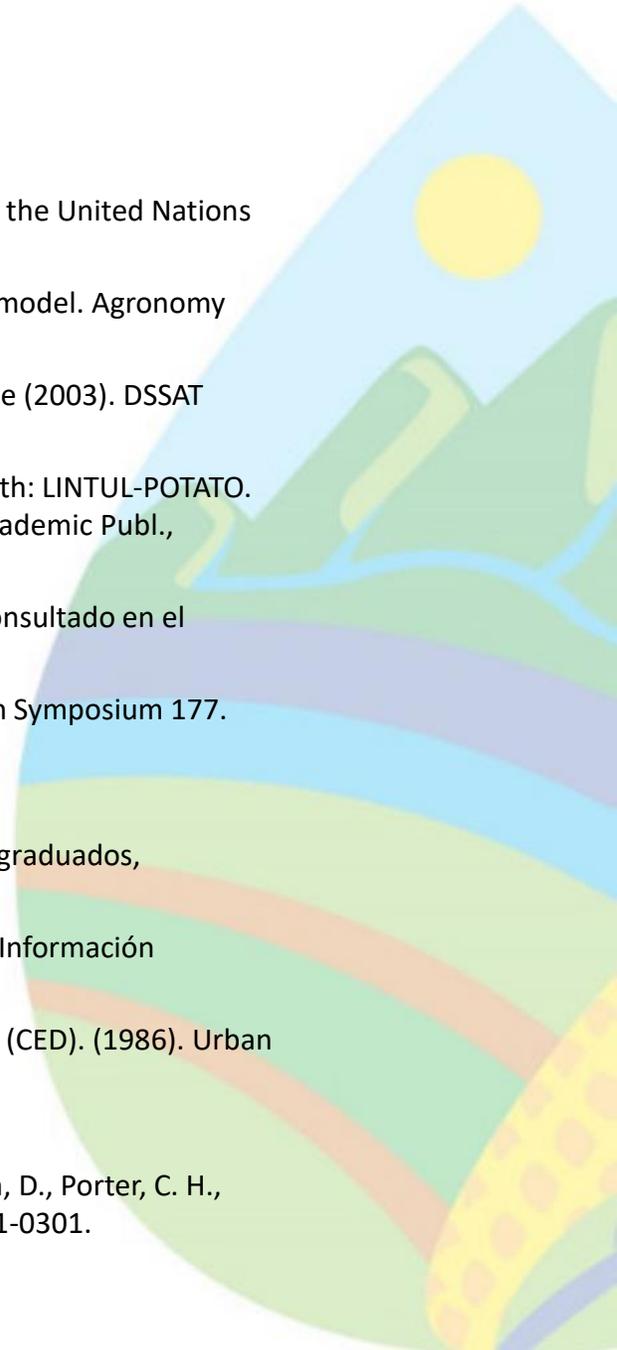
- Usando los parámetros de las seis variedades de papa reportados en Zhao et., al (2019), ninguna simuló adecuadamente el crecimiento observado para la variedad 'Alpha' en Mochis, Sinaloa. Por lo que se necesitó hacer una calibración de los parámetros siendo RUE y la $f(\text{solar})$ los más importantes, debido a que el modelo está basado en la eficiencia del uso de la radiación.
- Una vez calibrado el modelo tuvo un buen ajuste para el experimento de acuerdo con los estadísticos por lo que es capaz de simular la biomasa acumulada para Alpha en Mochis, Sinaloa.
- Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más importantes que deben ser calibrados usando un método de optimización.





Bibliografía

- Food and Agriculture Organization Statistical (FAOSTAT). (2019). FAO Statistical Database 2019. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. Consultado el 10/06/2019 en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Hodges T., S. L. Johnson and B. S. Johnson (1992). A modular structure for crop simulation models: implemented in the SIMPOTATO model. *Agronomy Journal* 84:911-915
- Jones J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman and J. T. Ritchie (2003). DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.
- Kooman PL and AJ Haverkort (1995). Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: *Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth*. AJ Haverkort, DKL Mackerron. Eds. pp, 41-59, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2008). Año internacional de la papa. FAO. Roma, Italy. Consultado en el 12/07/2019 en: <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/index.html>
- Rabbinge, R. (1993). The ecological background of food production. In: *Crop Protection and Sustainable Agriculture*. Ciba Foundation Symposium 177. John Wiley and Sons, Chichester, UK. p. 2-29
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres (2009). *AquaCrop. Reference Manual*. FAO, Rome, Italy. 218 p.
- Ruíz Pérez Vladimir. (2014). *La modelación biológica con fines de planeación de distritos de riego*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. De México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). *Atlas Agroalimentario 2012-2018*. (1ra ed.). México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).
- United States Department of Agriculture Natural (USDA), Resources Conservation Service (RCS) & Conservation Engineering Division (CED). (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. USDA-RCS-CED. Technical Release.55 Second Ed.
- Woli, P., Jones, J., Ingram, K., Fraisse, C., 2012. Agricultural reference index for drought (ARID). *Agron. J.* 104 (2), 287–300.
- Zhao, C., Liu B., Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Kassie, B. T., Pavan, W., Shelia, V., Kim, K. S., Hernandez-Ochoa, I. M., Wallach, D., Porter, C. H., Stockle, C. O., Zhu, Y., Asseng, S. (2019). A SIMPLE crop model, *European Journal of Agronomy*. Volume 104, 2019, 97-106, ISSN 1161-0301. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.009>



GRACIAS



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.
Asociación Nacional de Asociaciones de Usuarios de Riego
Productores Agrícolas del Estado de Sinaloa S.C.

Contacto

José Alberto Jiménez Ayala¹; Agustín Ruíz García¹

Universidad Autónoma Chapingo

josealbertojairrigacion@gmail.com





Apéndice

Ecuaciones del modelo SIMPLE

$$\text{Biomass}_{\text{rate}} = \text{Radiation} * f_{\text{Solar}} * 10 * \text{RUE} * f(\text{CO}_2) * f(\text{Temp}) * \min(f(\text{Heat}), f(\text{Water})) \quad (1)$$

$$\text{Biomass}_{\text{cum}_{i+1}} = \text{Biomass}_{\text{cum}_i} + \text{Biomass}_{\text{rate}} \quad (2)$$

$$\text{Yield} = \text{Biomass}_{\text{cum}_{\text{maturity}}} * \text{HI} \quad (3)$$

donde:

$\text{Biomass}_{\text{rate}}$ es la tasa diaria de crecimiento de biomasa kg/ha.

f_{Solar} es la fracción de radiación interceptada por el dosel de un cultivo.

RUE es la eficiencia de uso de la radiación (o sea de la radiación interceptada cuanta se convierte en biomasa).

$f(\text{CO}_2) * f(\text{Temp}) * \min(f(\text{Heat}), f(\text{Water}))$ son el estrés e impacto que cada uno tiene sobre el incremento de biomasa.

Estas ecuaciones se implementaron en MATLAB





Apéndice

$$\bullet \Delta TT = \begin{cases} T - T_{\text{base}}, & T > T_{\text{base}} \\ 0, & T \leq T_{\text{base}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\bullet TT_{i+1} = TT_i + \Delta TT \quad (5)$$

$$\bullet f(\text{Temp}) = \begin{cases} 0, & T < T_{\text{base}} \\ \frac{T - T_{\text{base}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{base}}}, & T_{\text{base}} \leq T < T_{\text{opt}} \\ 1, & T \geq T_{\text{opt}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\bullet f(\text{heat}) = \begin{cases} 1, & T_{\text{max}} \leq T_{\text{heat}} \\ 1 - \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{heat}}}{T_{\text{extreme}} - T_{\text{heat}}}, & T_{\text{heat}} \leq T_{\text{max}} < T_{\text{extreme}} \\ 0, & T_{\text{max}} \geq T_{\text{extreme}} \end{cases} \quad (7)$$

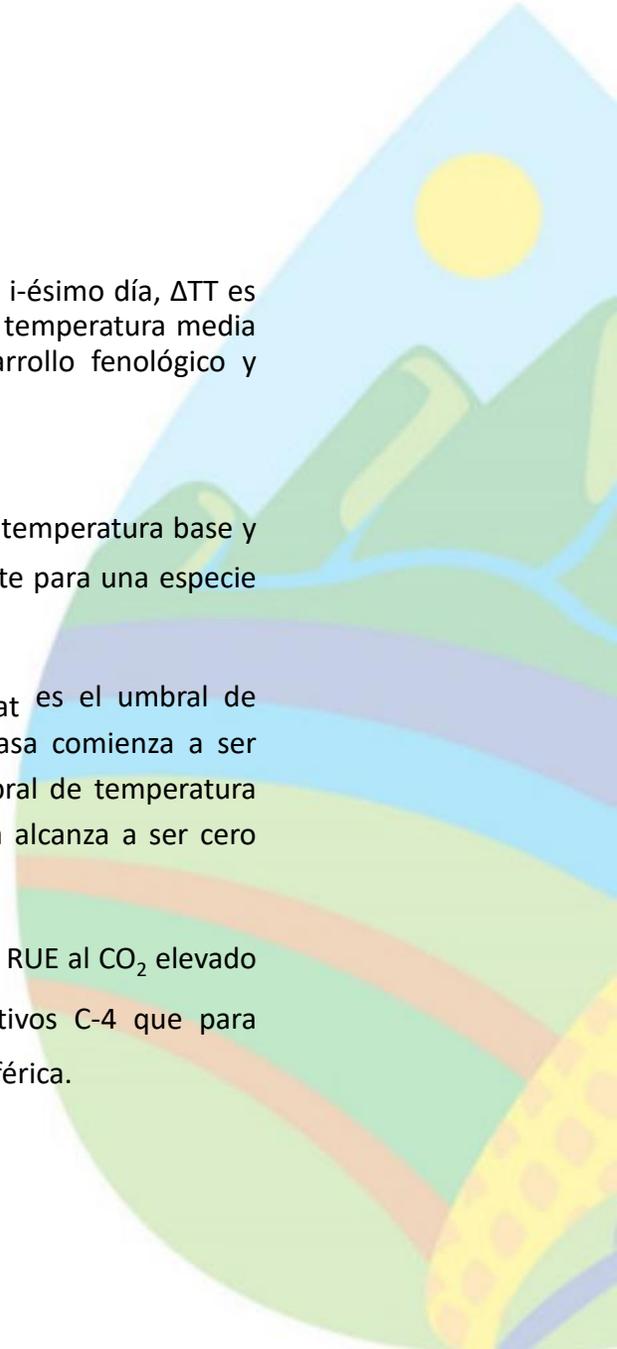
$$\bullet f(\text{CO}_2) = \begin{cases} 1 + S_{\text{CO}_2} * (\text{CO}_2 - 350), & 350 \leq \text{CO}_2 < 700 \text{ ppm} \\ 1 + S_{\text{CO}_2} * 350, & \text{CO}_2 > 700 \text{ ppm} \end{cases} \quad (8)$$

donde: TT_i es la temperatura media acumulada para el i -ésimo día, ΔTT es la temperatura media que se agrega en un día, T es la temperatura media diaria y T_{base} es la temperatura base para el desarrollo fenológico y también para el crecimiento del cultivo.

donde: T es la temperatura media, T_{base} y T_{opt} es la temperatura base y óptima para el crecimiento de biomasa respectivamente para una especie de cultivo dada.

donde: T_{max} es la máxima temperatura diaria, T_{heat} es el umbral de temperatura cuando la tasa de crecimiento de biomasa comienza a ser reducida por el estrés de calor y T_{extreme} es el umbral de temperatura extrema cuando la tasa de crecimiento de la biomasa alcanza a ser cero debido al estrés por calor.

donde: S_{CO_2} es la sensibilidad específica del cultivo de RUE al CO_2 elevado (por ejemplo, S_{CO_2} es usualmente menor para cultivos C-4 que para cultivos C-3), y el CO_2 es la concentración de CO_2 atmosférica.





Apéndice

$$\bullet f(\text{water})=1-S_{\text{water}}*\text{ARID} \quad (9)$$

$$\bullet \text{ARID}=1-\frac{\min(\text{ETo}0.096*\text{PAW})}{\text{ETo}} \quad (10)$$

$$\bullet f_{\text{Solar}}=\begin{cases} \frac{f_{\text{Solar_max}}}{1+e^{-0.01(\overline{T}-I_{50A})}}, & \text{período de crecimiento de la hoja} \\ \frac{f_{\text{Solar_max}}}{1+e^{-0.01(\overline{T}-(T_{\text{sum}}-I_{50B})}}, & \text{período de senescencia de la hoja} \end{cases} \quad (11)$$

$$\bullet I_{50B, i+1}=I_{50B, i}+I_{\text{max, heat}}*(1-f(\text{heat})) \quad (12)$$

$$\bullet I_{50B, i+1}=I_{50B, i}+I_{\text{max, water}}*(1-f(\text{water})) \quad (13)$$

$$\bullet f_{\text{Solar}_{\text{water}}}=\begin{cases} 0.9+f(\text{water}), & f(\text{water})<0.1 \\ 1, & f(\text{water})\geq 0.1 \end{cases} \quad (14)$$

donde: ARID es un índice estandarizado que va de 0 (sin escasez de agua) a 1 (escasez de agua extrema y estrés asociado por sequía). ARID es calculado en base a la cantidad de agua disponible en el perfil de suelo (PAW) y la evapotranspiración de referencia ETo, S_{water} es la sensibilidad de RUE al índice ARID

donde: I_{50A} es la temperatura acumulada requerida para el desarrollo del área foliar para interceptar el 50% de la radiación solar durante el cierre del dosel y (I_{50B}) la temperatura requerida para alcanzar el 50% de la radiación interceptada durante la senescencia del dosel y f_{Solar_max} es la máxima fracción de radiación interceptada que un cultivo puede alcanzar. Este es considerado con un parámetro de manejo, no un parámetro de cultivo, para tener en cuenta los diferentes espaciamientos entre plantas. Para la mayoría de los cultivos de alta densidad, este valor es considerado en 0.95.

donde: I_{max, water} es el incremento máximo diario en I_{50B} debido al estrés por sequía. Además, la radiación interceptada es afectada cuando el estrés por sequía se vuelve lo suficientemente severo, similar al modelo AquaCrop.

