

Modelos de simulación de cultivos como herramienta para el análisis de agroecosistemas

Roberto de Jesús López-Escudero¹

Felipe Gallardo-López¹

Gustavo López-Romero¹

Verónica Lango-Reynoso^{1,§}

Catalino Jorge López-Collado¹

Héctor Daniel Inurreta-Agruirre²

1 Campus Veracruz-Colegio de Postgraduados. Carretera Xalapa-Veracruz km 88.5, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México. CP. 91690. (lopez.roberto@colpos.mx; gallardo.felipe@colpos.mx; gustavolr@colpos.mx; ljorge@colpos.mx).

2 INIFAP. Carretera Federal Veracruz-Córdoba km 22.5, Medellín, Veracruz. México. (inurreta.hector@inifap.gob.mx).

Autora para correspondencia: lango.veronica@colpos.mx

Resumen

La teoría de sistemas pretende contextualizar y comprender el entorno del ser humano, siendo el agroecosistema un concepto que trata de comprender los procesos productivos de bienes y servicios derivados de la relación sinérgica entre naturaleza y sociedad. El concepto se ha deconstruido en al menos tres generaciones del pensamiento sistémico, logrando una visión más objetiva y práctica para utilizarse como una unidad de estudio en el diseño, gestión y evaluación de los agroecosistemas, por lo que se requieren herramientas que consideren la complejidad que conlleva el uso del concepto. En este sentido, los modelos de cultivos son una opción viable para analizar el ámbito biofísico de los agroecosistemas, considerando la importancia y necesaria complementariedad del paradigma introspectivo vivencial para comprender el entorno social que conlleva la cibernética de los sistemas de producción. El objetivo de esta investigación fue describir teóricamente la aplicación de los modelos de simulación de cultivos en la gestión y evaluación de agroecosistemas para coadyuvar a su eficiente desarrollo.

Palabras clave:

modelaje, pensamiento sistémico, sistemas agrícolas.



La agricultura transformó la vida de la humanidad al pasar de formas nómadas a sedentarias y sus excedentes productivos originaron la división social del trabajo y el aumento en la complejidad de las sociedades (Harari, 2015). El enfoque de agroecosistemas (AES) considera los aspectos físico-biológicos de la ecología y el contenido social de lo agrícola. La diferencia entre un ecosistema y el agroecosistema radica en la intervención del hombre como transformador del ecosistema natural para obtener productos (Gliessman, 2002).

Por lo tanto, este sistema considera los aspectos físico-biológicos relacionados con la ecología y los aspectos sociales, económicos, culturales y políticos que influyen la producción de alimentos, bienes y servicios. Esta corriente de pensamiento se fundamenta en el holismo y la teoría general de sistemas (TGS) de Von Bertalanffy (1976), cuya episteme considera a las ciencias agrícolas como un ente interrelacionado por saberes disciplinarios, y adopta un pensamiento basado en la totalidad y sus componentes, para entender la realidad del sector productivo.

En los sistemas sus partes actúan con una orientación y finalidad común, requiriendo del correcto funcionamiento de sus elementos para su desempeño eficaz (Chiavenato, 1997). En analogía, el desarrollo agrícola es un proceso de cambio que impacta las estructuras nacionales económica, social, política, física, así como el sistema de valores y la forma de vida del pueblo (Weitz, 1971).

Los agroecosistemas son complejos y al modificarlos hay que considerar sus elementos e interacciones. Los modelos de cultivos mecanicistas (MCM) son útiles para abordar tal complejidad. Estos modelos son una representación matemática detallada de los procesos físicos, biológicos y químicos en un cultivo determinado, para entender y simular su comportamiento. Los MCM son altamente detallados y precisos, pero requieren un gran volumen de datos y un alto grado de complejidad para su construcción y uso (Jones *et al.*, 2017a).

La mayoría de los MCM incluyen un módulo de manejo de cultivos (Williams *et al.*, 1989; Brisson *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003), el cual permite al usuario alterar el sistema a voluntad, además de realizar múltiples simulaciones bajo diferentes escenarios de manejo, extendiendo la capacidad de predicción con un reducido costo en tiempo y recursos. Considerando la importancia del enfoque de AES para modificar la productividad agrícola y la aplicación de los MCM para este fin, el presente trabajo describe teóricamente la actuación de los modelos de simulación de cultivos en la gestión y evaluación de los agroecosistemas para su eficiente desarrollo. Para lo cual, se incluye una descripción sobre la evolución del concepto de AES, así como la perspectiva teórica del funcionamiento y uso de los MCM en la gestión y evaluación de agroecosistemas.

El concepto de agroecosistema: primera y segunda generación de pensamiento sistémico

Los planteamientos de la primera generación del pensamiento sistémico, como la cibernética y las teorías de investigación de operaciones e información, fueron insuficientes para abordar la realidad agrícola, al considerar el funcionamiento de sistemas cerrados. Durante la segunda generación del pensamiento sistémico, la TGS de Von Bertalanffy (1976), fundamentó a la agroecología y al agroecosistema como su unidad de estudio.

La agroecología se consolidó mediante la jerarquía para definir el objeto de estudio a través de la identificación de subsistemas, sistemas y suprasistemas planteados por la TGS, facilitando el diseño metodológico de las investigaciones (Casanova *et al.*, 2016). La diferencia entre ambas generaciones radica en el reconocimiento de la complejidad de los AES, incluyendo aspectos sociales, políticos, económicos y ecológicos, además de su consideración como un modelo conceptual.

Al definir el agroecosistema, históricamente los conceptos de los autores presentan similitudes y diferencias de acuerdo con su corriente de pensamiento. Hernández (1977), lo describe como un ecosistema con modificaciones graduales para aprovechar recursos naturales. Montaldo (1982), enfatiza en la responsabilidad humana en la creación de estos sistemas y su sostenibilidad. Hart (1985), lo considera un sistema con interacciones específicas de especies y flujos de energía. Para Marten y Rambo (1988), son ecosistemas modificados por el hombre para la producción agrícola y pecuaria. Platas-Rosado *et al.* (2017) lo describen como un área de estudio con características propias.

Referente al rol del hombre en el agroecosistema, Altieri (1995), destaca su capacidad de control y definición de la producción. Como lo analizan Palacios y Dávila (2023), desde un enfoque epistémico-científico con base en la teoría de sistemas, sistemas de ecuaciones y bajo un sistema de conceptos agroecológicos, en contraparte con la doxa de la rumorología (sistemas eléctricos, mecánicos y biológicos), los agroecosistemas necesitan de un controlador cibernético (campesino o agricultor). Estos autores señalaron a la participación humana y la producción agrícola como esencia del agroecosistema. En donde la participación del hombre, mediante sus decisiones, influye en su gestión y evaluación, considerando las interacciones entre el ecosistema y agricultura en sus procesos de cambio y desarrollo, limitados por los intereses propios o sociales del controlador.

El agroecosistema como unidad de estudio autopoietica: tercera generación de pensamiento sistémico

Para llenar los vacíos de conocimiento, las aportaciones de la tercera generación de pensamiento sistémico incluyeron la teoría de sistemas sociales autopoieticos de Luhmann (2006), cuya arquitectura conceptual y teórica desconoce límites político-administrativos. Estudia, con mayor abstracción, el rol de la economía, la política y la ciencia en la evolución de la agricultura contemporánea. Este constructo emplea herramientas estructurales para comprender las complejas relaciones entre sociedad y naturaleza, desde lo global y lo local, lo espacial y lo temporal (Casanova- Pérez *et al.*, 2015; Cruz-Bautista *et al.*, 2017).

Como antecedente de esta teoría, Loveluck (1985), postuló la teoría de Gaia estableciendo que los sistemas vivos, como la Tierra, se autorregulan y conllevan procesos de sinergismo, mutualismo y procesos endógenos intrínsecos con relaciones sistémicas. Posteriormente, Maturana y Varela (2004), introdujeron el término 'autopoiesis', describiendo la capacidad de los sistemas vivos para generar y reproducir sus propios componentes, manteniendo su organización y estabilidad. Por lo tanto, los sistemas autopoieticos son aquellos sistemas complejos capaces de mantener y reproducirse a si mismos mediante un proceso de retroalimentación.

Autores como Luhmann (2006), en su teoría de sistemas sociales autopoieticos extendió este concepto hacia aquellos sistemas sociales que se mantienen y reproducen autónomamente mediante la producción y reproducción continua de sus componentes, integrados por las normas, valores y reglas que regulan su funcionamiento. Para Vilaboa *et al.* (2006), el agroecosistema es un sistema ecológico modificado por el hombre, como ente social y comunicativo, cuyo rol determina el uso de los recursos naturales en la producción y analiza el entorno integrado por los factores productivos.

De acuerdo con Vilaboa *et al.* (2009), el enfoque y concepto de agroecosistema es un modelo abstracto y de investigación para interpretar la realidad agrícola. Por su parte Bustillos *et al.* (2009), consideran al AES como una unidad autopoietica, donde existe un enlace estructural entre el hombre y el ambiente. Sandoval y Villanueva (2009), consideran al AES como unidad de estudio de los sistemas de producción agrícola, donde se ejerce el control humano sobre los recursos naturales para producir los alimentos y materias primas demandados por la sociedad.

Por tanto, en los agroecosistemas, la translocación de energía y fuentes de energía que el hombre modifica en la unidad de estudio, suceden bajo un proceso deliberado de acuerdo con los procesos de transformación del controlador cibernético. Con la evolución del pensamiento sistémico en su tercera generación, el concepto de AES, de línea epistemológica galileana (Cruz-Bautista *et al.*, 2017), se consolida como un enfoque multidisciplinario integrador de aspectos cibernéticos, teóricos y metodológicos para entender y analizar la interacción hombre-naturaleza.



El AES se entendió como sistema autopoietico, unidad de estudio y modelo que refleja la complejidad y la interconexión de los procesos ecológicos, sociales y económicos propios. Como Altieri y Toledo (2011) señalan, la complejidad de un AES como ente bio-físico-social, requiere enfoques transdisciplinarios para comprender en profundidad las interacciones y procesos que influyen en su funcionamiento.

Desde un enfoque agroecológico, se pretende conciliar a las ciencias naturales y sociales, para comprender la relación entre los procesos ambientales, económicos y sociales que inciden en la estructura y la función del agroecosistema. En este sentido, Altieri y Toledo (2011) proponen que, los agrónomos comprendan los elementos socioculturales y económicos de los agroecosistemas y a su vez, los científicos sociales se retroalimenten de ello. En el contexto de la agricultura contemporánea, el agroecosistema debe estudiarse como una totalidad, reconociendo al ser humano y su contexto social como un agente de cambio en la toma de decisiones.

Para este estudio y considerando los diferentes enfoques sistémicos, se construye el siguiente concepto: el agroecosistema es un modelo de la realidad que estudia los ecosistemas modificados por el hombre, para producir alimentos, fibras y otros productos agrícolas. Su estudio, análisis y gestión compleja requiere un enfoque transdisciplinario para comprender la relación entre los procesos físicos, biológicos y sociales que inciden en su estructura y función.

Es dinámico, en función de los cambios ambientales y las acciones humanas. Se caracteriza por su propiedad autopoietica, que implica intercambio de materia y energía con el exterior. El análisis de sus aspectos físico-biológicos y técnicos se realiza mediante modelos de simulación de cultivos mecanicistas que consideran bajo distintos entornos o escenarios.

Modelos de simulación de cultivos mecanicistas: diseño, gestión y evaluación de los agroecosistemas

La realidad ha sido abordada desde diversas perspectivas filosóficas a lo largo de la historia. Platón sostuvo una visión dualista donde el mundo inteligible de las ideas y formas representa la verdadera realidad, contrastando con la teoría de Aristóteles que observa de forma empírica el mundo sensible (Aguirre, 2015). En la Edad Media, Tomás de Aquino defendió que la realidad es creada por Dios y se conoce a través de la razón y la revelación divina (Tomás, 2020).

Durante la Ilustración, filósofos como Descartes propusieron una teoría basada en la duda metódica y la razón, argumentando que la verdadera realidad se conoce mediante la evidencia empírica (Descartes, 2012). Kant, por su parte, planteó una teoría platonista donde la realidad es construida por la mente humana a través de categorías y conceptos a priori (Kant, 2020). En el siglo XX, existencialistas como Heidegger y Sartre argumentaron que la realidad es subjetiva y vivencial para el sujeto (Sartre, 2006). Desde la perspectiva de la TGS, se reconoce que la realidad es compleja y se compone de múltiples niveles y tipos de sistemas interconectados en evolución constante (Von Bertalanffy, 1976).

Una estrategia para abordar la complejidad de la realidad es la construcción de modelos. Según Galagovsky y Aduriz-Bravo (2001), un modelo es una abstracción que busca representar la realidad mediante la predicción de fenómenos mediante un sistema de análisis. Boccara (2004), define un modelo como una representación matemática simplificada capaz de capturar elementos clave del sistema.

Los AES, al ser parte de la realidad humana, son complejos e involucran procesos físicos, biológicos y sociales interrelacionados, junto con cuestiones objetivas y subjetivas. Para comprender y modificar los AES de manera efectiva, es necesario abordarlos de manera holística, identificando sus interconexiones, subordinaciones y retroalimentación de procesos, así como las subjetividades del manejador como cultura, escala de valores, prioridades o deseos.

Los modelos de simulación agrícola, utilizados en el sector productivo para respaldar decisiones, calculan, pronostican y evalúan aspectos ambientales y de manejo de recursos, considerando la variabilidad espacial del suelo y las condiciones meteorológicas (Sargent, 2013). Según Leiva

(2008), estos modelos son herramientas para comprender escenarios de interacciones fisiológicas, ambientales y humanas en los ciclos de AES agrícolas, permitiendo la planificación de labores para alcanzar rendimientos esperados y evaluar impactos ambientales.

Los modelos de simulación agrícola también facilitan la evaluación y mejora de prácticas de manejo, la predicción de impactos y el soporte en procesos de toma de decisiones. Algunos integran múltiples submodelos para simular varios cultivos o mejorar la evaluación del rendimiento, mientras que otros incorporan Sistemas de Información Geográfica (SIG) para una zonificación precisa del potencial productivo (Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

Los modelos de simulación para el crecimiento de cultivos son herramientas fundamentales para evaluar la productividad en relación con diversos factores con base en cambios en el clima (temperatura máxima diaria; temperatura mínima diaria, precipitación diaria, radiación solar, humedad relativa, etc.), cuestiones edáficas (textura, pH, capacidad de intercambio catiónico, albedo, USLE K, contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica, conductividad hidráulica, profundidad, número de horizontes, etc.), parámetros fisiológicos (altura del dosel, índice de área foliar, eficiencia en el uso de la radiación, factor de reflexión de la luz solar, intercambio gaseoso estomático, temperatura máxima y mínima ideal, índice de cosecha, etc.) y manejo (fecha de siembra, fechas y tipo de operaciones culturales, fechas de dosis de fertilización, fecha de cosecha. Siendo ejemplos los modelos de cultivos: Epic (Williams *et al.*, 1989), Swat (Arnold, 1998), Dssat (Jones *et al.*, 1998).

Aunque los modelos actuales no abordan toda la complejidad de un AES, sí logran predecir el comportamiento de los cultivos bajo diferentes escenarios. Estos modelos representan de manera simplificada las variables clave del sistema, utilizando símbolos, diagramas y ecuaciones para imitar su funcionamiento y obtener resultados predictivos.

La creación de un modelo de cultivos implica definir el sistema, estableciendo límites entre lo interior y lo exterior, además de elaborar un diagrama de flujo con entradas, procesos interconectados y salidas. Mediante el modelo, se simula el desarrollo del AES desde condiciones iniciales y variables de entrada, evaluando el efecto de diversas medidas con bajos costos en tiempo y recursos.

Los modelos de simulación, en comparación con los descriptivos, ofrecen ventajas significativas al permitir entender las relaciones entre componentes y prever efectos de manipulaciones. Estos modelos pueden ser estadísticos, basados en datos históricos, limitados a áreas geográficas y temporalidades específicas o basados en procesos fisiológicos para imitar la influencia ambiental en el crecimiento y rendimiento de cultivos (Lobell y Asseng, 2017; Jones *et al.*, 2017b).

Los modelos de cultivo basados en procesos representan ecuaciones matemáticas que describen los procesos internos de la planta y las interacciones con su entorno (Kephe *et al.*, 2021) o bien, son herramientas que utilizan ecuaciones matemáticas para describir el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos, influenciados por condiciones ambientales y prácticas de manejo (Chenu *et al.*, 2017).

El desarrollo de modelos de cultivos basados en procesos se remonta a la década de los años 1960, considerando desde ecuaciones simples para estimar el rendimiento hasta plataformas integradoras complejas como Dssat (Jones *et al.*, 2003) o Stics (Brisson *et al.*, 2003), e incluso modelos tridimensionales como Hi-sAFe (Dupraz *et al.*, 2019) para simular sistemas agrícolas complejos. Esta evolución se ha visto impulsada por avances en la capacidad computacional y la reducción de costos.

Según Basso *et al.* (2013), los modelos de simulación de cultivos basados en procesos pueden ser mecanicistas o funcionales. Los modelos mecanicistas representan rigurosamente los procesos fisiológicos de los cultivos, utilizando datos detallados como la interceptación de luz y el intercambio gaseoso del dosel (Farquhar *et al.*, 1980), mientras que los modelos funcionales como el índice de eficiencia en el uso de la radiación (Asseng *et al.*, 2019) son más simplificados y requieren datos más generales.

De acuerdo con Jones *et al.* (2017b), el desarrollo de modelos de cultivos basados en procesos se motiva tanto por la comprensión científica como por el apoyo a las decisiones políticas. Los modelos

mecanicistas se centran en la comprensión científica, mientras que los modelos funcionales son más útiles para el diseño, gestión y evaluación de agroecosistemas, debido a su enfoque menos complejo y exigencia de menos variables específicas.

Con base a lo que mencionan Candelaria *et al.* (2011), los modelos de cultivos no representan directamente al AES en su totalidad, sino que son una representación simplificada del subsistema de cultivo. El AES abarca fenómenos biofísicos, sociales, económicos y culturales que no pueden incluirse por completo en un modelo de cultivos, afectando las decisiones sobre qué simular y cómo interpretar la información resultante.

Conclusiones

El concepto de agroecosistema es una abstracción histórica influenciada por el entendimiento de los sistemas naturales y sociales. Desde el surgimiento de la TGS se ha tratado de comprender los procesos involucrados en las relaciones entre sociedad, naturaleza y procesos productivos de bienes y servicios. Al tratarse de una abstracción, el origen del concepto ha trascendido mediante hipótesis y las corrientes de pensamiento de diversos autores que han justificado el uso del concepto de acuerdo con su episteme. El concepto evolucionó por la retroalimentación de ideas de cada autor de acuerdo con su temporalidad.

En la primera y segunda generación de pensamiento sistémico se consideró la relación ser humano-ecosistema para posteriormente incluir a la sociedad y su entorno. Con las teorías de los sistemas sociales autopoieticos de la tercera generación el agroecosistema se comprendió de manera más factible, objetiva, utilizable como unidad de estudio y menos falible; logrando una conceptualización más objetiva y una interpretación cercana a la realidad del entorno agronómico y social.

El diseño, gestión y evaluación de los AES requieren herramientas que involucren y envuelvan la complejidad que conlleva el uso del concepto. Desde la perspectiva del enfoque empírico inductivo de la línea galileana, los modelos de cultivos son una opción factible para el análisis de los agroecosistemas en el ámbito bio-físico, sin olvidar las herramientas de la línea introspectiva vivencial inmersas en el entorno social que conlleva la cibernética de los sistemas de producción.

Bibliografía

- 1 Aguirre, J. 2015. Dialéctica y filosofía primera. Lectura de la metafísica de Aristóteles. Vol. 115. Prensas de la Universidad de Zaragoza. España. 133 p.
- 2 Altieri M. A. 1995. El agroecosistema: determinantes, recursos, procesos y sustentabilidad. *In*: agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable. 2^{da}. Ed. Clades. Santiago, Chile. 22-31 pp.
- 3 Altieri, M. A. and Toledo, V. M. 2011. The agroecological revolution of Latin America: rescuing nature, securing food sovereignty, and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*. 38(1):587- 612. 10.1080/03066150.2011.582947.
- 4 Arnold, J. G.; Sirinivasan, R.; Muttiah, R. S. and Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: model development. Estados Unidos. *Journal of the American water resources association*. 34(1):73-89. 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- 5 Asseng, S. S.; Martre, P.; Ewert, F. A.; Dreccer, M. F.; Beres, B. L. 2019. Model-driven multidisciplinary global research to meet future needs: the case for 'improving radiation use efficiency to increase yield'. *Asseng-Senthold-TUM. Crop Science*. 59(1):843-849. 10.2135/cropsci2018.09.0562.
- 6 Basso, B. B.; Cammarano, D. D.; Fiorentino, C. C. and Ritchie, J. T. 2013. Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. *European journal of Agronomy*. 51(1):65-70. 10.1016/j.eja.2013.06.007.

- 7 Boccara, N. S. 2004. Cellular automata. Modeling complex systems. Springer. New York, NY. 191-273 pp. 10.1007/0-387-21646-4-6.
- 8 Brisson, N. N.; Gary, C. C.; Justes, E. E.; Roche, R. R. and Mary, B. B. 2003. An overview of the crop model STICS. European journal of Agronomy. 18(3-4):309-332. 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.
- 9 Bustillos, L. G.; Martínez, J. P.; Osorio, A. F.; Salazar, L. S.; González, A. I. y Gallardo, L. F. 2009. Grado de sustentabilidad del desarrollo rural en productores de subsistencia, transicionales y empresariales, bajo un enfoque autopoietico. Venezuela. Revista Científica FCV-LUZ. 19(6):650- 658.
- 10 Candelaria, M. B.; Ruiz, R. O.; Gallardo, L. F.; Pérez, H. P.; Martínez, B. Á. y Vargas, V. L. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. México. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 14(3):999-1010. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93921493004>.
- 11 Carvalho-Lopes, D. and Steidle-Neto, A. J. 2011. Simulation models applied to crops with potential for biodiesel production. Computers and electronics in agriculture. 75(1):1-9. 10.1016/j.compag.2010.10.002.
- 12 Casanova-Pérez, L.; Martínez-Dávila, J.; López-Ortiz, S.; Landeros-Sánchez, C.; López-Romero, G. y Peña-Olvera, B. 2015. Enfoques del pensamiento complejo en el agroecosistema. Venezuela. Interciencia. 40(3):210-217. <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=33934728001>.
- 13 Casanova, P. L.; Martínez, D. J. P.; López, O. S. and López, R. G. 2016. De von Bertalanffy a Luhmann: deconstrucción del concepto 'agroecosistema' a través de las generaciones sistémicas. Revista Mad.Madrid, España. 1(35):60-74. <https://www.redalyc.org/pdf/3112/311246905005.pdf>.
- 14 Chenu, K. K.; Porter, J. R.; Martre, P.; Basso, B. B.; Chapman, S. C.; Ewert, F. A.; Bindi, M. M. and Asseng, S. S. 2017. Contribution of crop models to adaptation in wheat. Reino Unido. Trends in Plant Science. 22(6):472-490. Doi: 10.1016/j.tplants.2017.02.003.
- 15 Chiavenato, I. A. S. 1997. Teoría de sistemas. *In*: introducción a la teoría general de la administración. 4^{ta} Ed. McGraw-Hill. México. 725-761 pp.
- 16 Cruz-Bautista, P.; Martínez-Dávila, J. P.; Osorio-Acosta, F.; López-Romero, G.; Estrella-Chulin, N. y Regalado-López, J. 2017. Marco epistémico para estudiar los agroecosistemas. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 8(1):159-170. 10.29312/remexca.v8i1.79.
- 17 Descartes, R. B. 2012. Meditaciones metafísicas. Trad. Méditations métaphysiques por Gálvez, J. G. Ecuador. 153 p.
- 18 Dupraz, C. L.; Wolz, K. J.; Lecomte, I. C.; Talbot, G. G. and Vincent, G. G. 2019. Hi-sAFe: a 3D agroforestry model for integrating dynamic tree crop interactions. Suiza. Sustainability. 11(8): 2293-2318. 10.3390/su11082293.
- 19 Farquhar, G. D.; Caemmerer, S. V. and Berry, J. A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C 3 species. Alemania. Planta. 149(1):78-90. 10.1007/BF00386231.
- 20 Galagovsky, L. R. y Aduriz-Bravo, A. 2001. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales el concepto de modelo didáctico analógico. Argentina. Enseñanza de las Ciencias. 19(2):231-242.
- 21 Gliessman, S. R. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Ed. SR. Turrialba, Costa Rica. 359 p.
- 22 Harari, Y. N. 2015. Sapiens: una breve historia de la humanidad. Ed. Ilustrada. Natur & Kultur. Dinamarca. 496 p.

- 23 Hart, D. R. 1985. Conceptos básicos sobre agroecosistemas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 156 p.
- 24 Hernández, X. E. 1977. Agroecosistemas de México. CP-ENA. México. Ed. 42 p.
- 25 Jones, J. W.; Tsuji, G. Y.; Hoogenboom, G.; Hunt, L. A. and Thornton, P. K. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer. *In: DSSAT*. 3(7):157-177. 10.1007/978-94-017-3624-4-8.
- 26 Jones, J. W.; Hoogenboom, G.; Porter, C. H.; Boote, K. J.; Batchelor, W. D. 2003. The DSSAT cropping system model. Reino Unido. *European Journal of Agronomy*. 18(3-4):235-265. 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
- 27 Jones, J. W.; Antle, J. M.; Basso, B. B.; Boote, K. J. and Conant, R. T. 2017a. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: state of agricultural systems science. *Agric. Syst.* 155(1):269-288. 10.1016/j.agsy.2016.09.021.
- 28 Jones, J. W.; Antle, J. M.; Basso, B.; Boote, K. J.; Conant, R. T.; Foster, I. T. & Wheeler, T. R. 2017b. Brief history of agricultural systems modeling. Reino Unido. *Agricultural Systems*. 155(1):240-254. 10.1016/j.agsy.2016.05.014.
- 29 Kant, I. 2020. Crítica de la razón pura. Traducción de la obra 'Kritik der reinen Vernunft' por Alexis Padrón Alfonso. Verbum. España. 646 p.
- 30 Kephe, P. N.; Ayisi, K. K. and Petja, B. M. 2021. Challenges and opportunities in crop simulation modelling under seasonal and projected climate change scenarios for crop production in South Africa. *South Africa. Agriculture and Food Security*. 10(1):1-24. 10.1186/s40066-020-00283-5.
- 31 Leiva, F. R.; Buitrago, J. Y.; Rodríguez, J. S. y Guerrero, L. C. 2008. Aproximación a la agricultura de precisión (AP) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia. *In: F. R. Agricultura de precisión en cultivos transitorios*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 43-71 pp.
- 32 Lobell, D. B. and Asseng, S. S. 2017. Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models. Reino Unido. *Environmental Research Letters*. 12(1):3-11. 10.1088/1748-9326/aa518a.
- 33 Lovelock, J. E. 1985. Gaia: una nueva visión de la vida sobre la Tierra. Orbis. Barcelona, España. 185 p.
- 34 Luhmann, N. 2006. La sociedad de la sociedad. Herder. Universidad Iberoamericana. México, DF. 1024 p.
- 35 Marten, G. G. and Rambo, A. T. 1988. Guidelines for writing comparative case studies on Southeast Asian rural ecosystems. *In: agroecosystem research for rural development*. Rerkasem, K. K. and Rambo, A. T. Ed. Multiple Cropping Centre. Chiangmai University. Tailandia. 263-285 pp.
- 36 Maturana, H. R. y Varela, F. G. 2004. De máquinas y seres vivos: autopoiesis: la organización de lo vivo. 6^{ta} Ed. Universitaria. Luhmann. Santiago, Chile. 137 p.
- 37 Montaldo, B. P. 1982. Agroecología del trópico americano. IICA. San José, Costa Rica. 11 p.
- 38 Palacios, V. C. y Dávila, J. P. M. 2023. El agroecosistema como sistema social. Venezuela. *Interciencia*. 48(2):102-108. <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2023/02/05-6922-E-Martinez-Davila-v48n2-7.pdf>.
- 39 Platas-Rosado, D. E.; Vilaboa-Arroniz, J.; González-Reynoso, L.; Severino-Lendechy, V. H.; López-Romero, G. y Vilaboa-Arroniz, I. 2017. Un análisis teórico para el estudio de los agroecosistemas. México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 20(3):395-399. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93953814017>.
- 40 Sartre, J. P. 2006. El existencialismo es un humanismo. Vol. 37. FPE. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF. 36 p.

- 41 Sandoval, C. C. A. y Villanueva, J. J. A. 2009. Scope, sections, policies and language issues in TSA. México. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 10(2):1-2. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/download/354/68>.
- 42 Sargent, R. G. 2013. Verification and validation of simulation models. Reino Unido. Journal of Simulation. 7(1):12-24. 10.1057/jos.2012.20.
- 43 Tomás, A. S. 2020. Suma de teología: [primeira parte-questões 84-89]. EDUFU. Brasil. 279 p.
- 44 Vilaboa, J. A.; Díaz, P. R.; Ortega, E. J. y Rodríguez, M. C. A. 2006. Productividad y autonomía en dos sistemas de producción ovina: dos propiedades emergentes de los agroecosistemas. Venezuela. Interciencia. 31(1):37-44. <http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S037818442006000100008&lng=es&nrm=iso>.
- 45 Vilaboa-Arroniz, J.; Díaz-Rivera, P.; Ruiz-Rosado, O.; Platas-Rosado, D. E.; González-Muñoz, S. y Juárez-Lagunes, F. 2009. Caracterización socioeconómica y tecnológica de los agroecosistemas con bovinos de doble propósito de la región del Papaloapan, Veracruz, México. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 10(1):53-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243005>.
- 46 Von-Bertalanffy, L. 1976. Teoría general de los sistemas. México. . Fondo de Cultura Económica (FCE). México, DF. 336 p.
- 47 Weitz, R. 1971. Regional planning for rural development in developing countries: rural development in a changing world. London, England. 587 p.
- 48 Williams, J. R.; Jones, C. A.; Kiniry, J. R. and Spanel, D. A. 1989. The EPIC crop growth model. Estados Unidos. Transactions of the ASAE. 32(2):0497-0511. 10.13031/2013.31032.



Modelos de simulación de cultivos como herramienta para el análisis de agroecosistemas

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 February 2025
Date accepted: 01 May 2025
Publication date: 11 July 2025
Publication date: May-Jun 2025
Volume: 16
Issue: 4
Electronic Location Identifier: e3674
Publisher ID: 00016
Article Id (other): 00016

Categories

Subject: Ensayo

Palabras clave:

Palabras clave:

modelaje
pensamiento sistémico
sistemas agrícolas.

Counts

Figures: 0
Tables: 0
Equations: 0
References: 48
Pages: 0