

UN MODELO DE SIMULACIÓN GENÉRICO DE UNA PRODUCTORA DE ARROZ

Mejías P., Ixhel¹
Ramírez N., Vicente²

Recibido: 03-10-2014

Revisado: 03-05-2015

Aceptado: 11-05-2015

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de simulación genérico de una productora de arroz venezolana, a través de la metodología de Dinámica de Sistemas. Se consideraron las etapas del proceso de producción primaria, desde la siembra hasta la cosecha del arroz *paddy* y su traslado a molinos. Se realizó una descripción del sistema productivo, que sirvió de base para la construcción del modelo, utilizando el software Vensim. Luego de validar el modelo y de realizar el análisis de sensibilidad, se llevó a cabo el estudio de distintos escenarios, para vislumbrar el comportamiento de la productora bajo diversas condiciones. Como resultado del análisis de escenarios, se observaron las variaciones presentadas en el rendimiento del cultivo al ser afectado por plagas y/o malezas, en distintas magnitudes de incidencia. Además, se confirmó lo expuesto en la literatura especializada del sector arrocero, acerca de las variaciones de la densidad de siembra y su efecto sobre el rendimiento. Por otra parte se ratificó el carácter genérico del modelo, el cual permite su adecuación a cualquier productora de arroz, partiendo de la estructura propuesta y calibrando los parámetros pertinentes. **Palabras clave:** dinámica de sistemas, explotaciones arroceras, producción, modelado, simulación, Venezuela

ABSTRACT

This paper presents a generic simulation model of a Venezuelan rice producer, by using the methodology of System Dynamics. The stages of primary production were considered, from planting until harvesting paddy rice and shipping it to the mills. A description of the production system was performed, which was the basis for the construction of the model, by using the software Vensim. After validating the model and performing the sensitivity analysis, the analysis of several different scenarios was conducted, in order to perceive the behavior of the producer, under a diversity of conditions. As a result of the scenario analysis, the variations of the crop yield after being affected by pests and/or weeds, in different magnitudes of impact, were observed. Furthermore, the information presented in the literature about rice issues, related to the changes in plant density and its effect on the crop yield was confirmed. Moreover, the generic nature of the model, which allows its adaptation to any rice producer based on the proposed structure and calibrating the relevant parameters, was ratified.

Keywords: modeling, production, rice farms, simulation, system dynamics, Venezuela

¹ Ingeniera de Sistemas (*Cum Laude*, Universidad de Los Andes, Venezuela); Estudiante de la Maestría en Modelado y Simulación de Sistemas del Centro de Simulación y Modelos, CESIMO (ULA, Venezuela). **Dirección postal:** Universidad de Los Andes, Núcleo La Hechicera, Facultad de Ingeniería. Escuela de Sistemas. Mérida 5101, Venezuela. **Teléfono:** +58-274-2451384; **e-mail:** ixalejandra@gmail.com

² Ingeniero de Sistemas (*Cum Laude*, Universidad de Los Andes, Venezuela); M.Sc. en Economía (London School of Economics, Reino Unido); Ph.D. en Economía (Universidad de Lugano, Suiza). Profesor Titular de la Escuela de Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes; Miembro Asociado del Centro de Simulación y Modelos, CESIMO-ULA. **Dirección Postal:** Universidad de Los Andes, Núcleo La Hechicera. Facultad de Ingeniería. Escuela de Sistemas. Mérida 5101, Venezuela. **Teléfono:** +58-274-2403002; **e-mail:** vicente@ula.ve

RÉSUMÉ

Ce travail présente un modèle de simulation générique pour une entreprise vénézuélienne productrice du riz, en utilisant la méthodologie dynamique des systèmes. Le travail considère les étapes du processus de production primaire, c'est à dire, dès les semailles jusqu'à la récolte du riz *paddy*, et aussi son transport vers les moulins. On a réalisé la description du système productif qui sert de base à la construction du modèle en utilisant le logiciel Vensim. Suite à la validation du modèle et à la réalisation de l'analyse de sensibilité, on a réalisé l'étude de différents scénarios pour découvrir le comportement de l'entreprise sous conditions variées. Comme résultat de l'analyse des scénarios on a observé les variations, suivant distinctes ampleurs d'incidence, de la productivité des rizières après avoir subi des pertes par des fléaux ou des mauvaises herbes. De plus on a confirmé les remarques réalisées dans la littérature spécialisée en la culture du riz, en relation aux variations de la densité des semailles et son effet sur la productivité. Par ailleurs, on a ratifié le caractère générique du modèle qui permet son adaptation pour n'importe quelle entreprise productrice du riz; pour cela il suffit de mesurer les paramètres concernés tout en partant de la structure proposé dans ce travail.

Mots-clé : dynamique des systèmes, exploitations du riz, modélisation, production, simulation, la Venezuela

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo apresentar um Modelo Genérico de Simulação de uma produtora de arroz venezuelana. A metodologia que norteia a investigação é a Dinâmica de Sistemas. Foram consideradas todas as etapas do processo de produção primária do arroz tipo *paddy*, *i.e.*, plantação, colheita e o traslado aos moinhos. Ao mesmo tempo, foi realizada uma descrição do sistema produtivo, que foi tomada como base para a construção do modelo, com auxílio do software Vensim. Depois de validar o Modelo e de fazer uma análise de sensibilidade, foi realizado um estudo dos diferentes cenários, para se ter uma ideia das variações originadas no rendimento da plantação quando forem afetadas por pragas ou ervas daninhas em diferentes graus de incidência. Tal premissa foi confirmada na literatura especializada do setor arrozeiro em termos das variações da densidade da plantação e o efeito correspondente no seu rendimento. Por outro lado, foi ratificado o caráter genérico do Modelo, o que permite a sua adequação em qualquer produtora de arroz, partindo da estrutura proposta e calibrando os parâmetros pertinentes.

Palavras-chave: dinâmica de sistemas, exploração do arroz, modelagem, produção, simulação, Venezuela

1. INTRODUCCIÓN

En Venezuela el arroz (*Oryza sativa* L.), junto con el maíz (*Zea mays* L.), corresponden a los principales cereales cultivados. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), desde el segundo semestre del 2007 hasta el mismo período del 2011, el consumo per cápita del arroz aumentó significativamente en el país (INE, 2014). Sin embargo, este incremento en el índice de consumo no fue acompañado con un crecimiento proporcional de la producción. En el año 2009, debido a las condiciones de sequía que se presentaron —especialmente en la zona arrocer de Guárico— y a la regulación de precios, disminuyó la producción del rubro a alrededor de 852.000 toneladas de arroz *paddy* seco; este cambio representó una caída de 7% con respecto al año anterior (FEDEAGRO, 2009; citado por Piñate, 2009). A fin de compensar los inventarios y atender la creciente demanda interna, se inició el proceso de

importación de arroz, principalmente por parte del Estado venezolano.

Desde el año 2011 ha aumentado la producción nacional del rubro. La Federación Venezolana de Asociaciones de Productores de Arroz (FEVEARROZ) señaló que la producción se incrementó en un 20% durante 2011, al pasar de 535.000 t de arroz *paddy* seco en 2010 a 645.000 t en el ciclo 2011-2012 (Contreras, 2011). En el 2012 se cosecharon 784.000 t y para el año 2013 la producción se incrementó un 25% con respecto al año anterior, para ubicarse en 980.000 t. Sin embargo, dicho gremio señaló que aún persiste la necesidad de importar para cubrir el déficit de la producción y así satisfacer la demanda nacional (Contreras, 2014).

En este escenario, es de interés conocer en todos sus detalles el proceso productivo de una productora de arroz, de manera que se pueda

indagar en los problemas y las dificultades de diversa índole que pudieran estar enfrentando las productoras en el país y que les impiden tener un alto nivel de rendimiento y productividad, así como también caracterizar los elementos clave de dichas productoras en general. Con estos fines se elaboró un modelo de simulación genérico de una unidad productora de arroz, que permitió analizar esta situación centrándose en el enfoque del productor. Para ello se utilizó la metodología Dinámica de Sistemas, propuesta por Forrester (1961) y Sterman (2000).

En las siguientes secciones se realiza una descripción de lo que en la literatura de Dinámica de Sistemas se llama sistema real. Además, se muestra la estructura del modelo de simulación construido de la unidad Productora, el cálculo de los parámetros que lo conforman y los resultados de la simulación base. Por otra parte se presenta un conjunto de pruebas realizadas al modelo, el análisis de diversos escenarios planteados y, finalmente, algunas conclusiones que surgen del estudio realizado. El trabajo se elaboró basándose en el proyecto de investigación realizado por Mejías (2014), en que se presenta un modelo de simulación genérico de una unidad productora de arroz.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA REAL

2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA UNIDAD PRODUCTORA DE ARROZ

Según Martínez (1998), las unidades productoras de arroz en Venezuela se ubican fundamentalmente en los llanos centrales (estado Guárico) y los llanos occidentales (estados Barinas, Cojedes y Portuguesa). Molina (1998) señala que las principales áreas de producción primaria del arroz y las instalaciones agroindustriales especializadas para su procesamiento se encuentran en los estados Portuguesa y Guárico, zonas donde la actividad comercial del rubro tuvo sus orígenes.

A nivel nacional, el patrón tecnológico para el cultivo del arroz está caracterizado por el uso de variedades mejoradas, el uso intensivo del suelo de parte de aquellos productores que tienen disponibilidad de agua para el riego, la implementación de procesos altamente mecanizados y la amplia utilización de agroquímicos (Martínez, 1998). Así mismo, en Venezuela una unidad de producción puede desarrollar su cultivo en dos períodos al año,

según su disponibilidad de agua. Estos dos períodos son: el verano o período de sequía (octubre-marzo/abril) y el invierno o período lluvioso (mayo-septiembre) (Molina, 1998).

2.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PRODUCTORES DE ARROZ

Molina (1999) propone una clasificación de los productores de arroz del Sistema de Riego Río Guárico (SRRG), la cual puede ser generalizada a nivel nacional. De esta manera, los productores del SRRG se pueden clasificar en tres grupos (pequeños, medianos y grandes productores), con características similares en cada uno, considerando «*el tamaño de las unidades promedios de explotación, la disponibilidad de medios de producción y las características socio-culturales de los productores*» (Molina, 1999, p. 28).

De acuerdo con lo expuesto por Molina (1999), los grandes productores o empresarios poseen parcelas cuya superficie explotada es mayor a 50 ha, que usualmente varía entre 100 y 150 ha. Algunos incluso tienen más de una parcela en el SRRG y generalmente son dueños de la maquinaria agrícola empleada. En cambio, los pequeños y medianos productores suelen acudir al alquiler de maquinaria ante productores que prestan el servicio. Los primeros son –en su mayoría– campesinos cuyas parcelas tienen una extensión cultivada máxima de 30 ha, en tanto que los segundos poseen parcelas cuyas extensiones explotadas oscilan entre 30 y 50 ha.

Se pueden apreciar ciertas diferencias en las prácticas agrícolas entre los pequeños, medianos y grandes productores, las cuales pueden afectar el rendimiento y el costo de producción. Estas diferencias tienen que ver con la cantidad de veces que se lleva a cabo la preparación del suelo y la aplicación de abonos e insumos durante el proceso. Sin embargo, de manera general, el proceso productivo es análogo entre estos grupos de productores (Molina, 1999).

Atendiendo a las diferencias existentes entre los pequeños, medianos y grandes productores y considerando la analogía entre sus procesos productivos, en la construcción del modelo de simulación genérico de una productora de arroz se trabajó bajo el supuesto que una unidad de producción grande abarca todos los elementos comunes de unidades pequeñas y medianas. No obstante, esto no necesariamente se cumple de

forma inversa, ya que podrían existir elementos intrínsecos exclusivos de las productoras de mayor tamaño. Por tal motivo se seleccionó como objeto de estudio una unidad de producción de mayores proporciones y capacidad, siendo esta la Unidad Productora identificada como «Parcela 199»³.

2.2. PROCESO PRODUCTIVO DEL ARROZ

A continuación se explica de manera general el proceso de producción del arroz, señalando las variantes y diferencias particulares de acuerdo con la región del país. Este comprende las siguientes actividades:

- **Riego:** de acuerdo con lo expresado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), en el país se emplea—de manera general—, la inundación de los suelos como modalidad de riego para el cultivo de arroz, siendo los métodos más utilizados el riego por bordas en curvas a nivel y el riego en melgas rectangulares o tanques (INIA, 2004).

- **Preparación o acondicionamiento de suelos:** según el INIA (2004), existen diversos métodos de preparación de suelos, a saber: i) preparación de suelos en seco; ii) preparación de suelos en fangueo o batido; iii) cero labranza; y, iv) mínima labranza. Durante el período de lluvia en el estado Portuguesa prevalece la preparación en seco, en tanto que en el período de sequía se prepara el suelo en fangueo o batido. En cambio, en el SRRG el terreno es preparado de manera casi exclusiva mediante fangueo durante ambos períodos (Martínez, 1998).

- **Siembra:** según el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), existen dos sistemas de siembra, los cuales son: la siembra directa y la siembra por trasplante, donde las plantas crecen inicialmente en invernaderos y luego son trasladadas al campo (CIAT, 1985). A nivel nacional, la siembra de arroz generalmente se hace esparciendo las semillas en el campo (Martínez, 1998). En el país se pueden distinguir numerosos métodos de siembra, según el período de siembra y la región (INIA, 2004).

- **Fertilización:** los suelos arroceros comúnmente presentan escasez de los siguientes elementos: nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y zinc. Sin embargo, por lo general se aplican

fertilizantes solo para cubrir la deficiencia de nitrógeno, fósforo y potasio. Tanto la época como el método de aplicación del fertilizante son de suma importancia para lograr la eficiencia del mismo y dependen del tipo de elemento que éste contenga (INIA, 2004).

- **Control de malezas:** según lo indicado por el CIAT (1985), las malezas afectan el rendimiento del cultivo del arroz, principalmente porque estas plantas compiten con las del arroz por los recursos requeridos para su desarrollo (luz, agua, espacio, nutrientes y dióxido de carbono). Para evitar y atenuar la presencia de malezas, es importante un control de las mismas a través del uso de productos químicos en épocas específicas del desarrollo del cultivo y de prácticas que refuerzan la efectividad del control químico, tales como: limpieza de campos, canales, muros, maquinarias y equipos, uso de semillas certificadas, buen manejo de las aguas de riego y adecuada preparación del suelo (INIA, 2004).

- **Control de plagas y enfermedades:** en el país, las plagas que afectan el cultivo del arroz se pueden dividir en dos grupos: insectos y vertebrados. Los principales insectos que ocasionan daños al cultivo son el gusano barredor, el insecto sogata, los chinches y el gorgojo acuático del arroz. Existen diversas medidas para el control de estos insectos, tales como: el manejo de malezas de manera eficiente y el empleo de productos químicos—siempre y cuando la población de insectos así lo requiera—, entre otras.

De manera específica, el chinche vaneador del grano de arroz (*Oebalus* sp.) es uno de los principales causantes de mermas en el rendimiento de este cultivo. Causa el vaneamiento del grano cuando este se encuentra en estado lechoso, pudiendo llegar a vaciarlo; y, cuando está pastoso, ocasiona el manchado del mismo, disminuyendo de esta manera el rendimiento agrícola y la calidad del grano (Martínez, 1998).

En cuanto a las plagas correspondientes a las especies vertebradas, el INIA (2004) señala como las más perjudiciales las siguientes: algunos roedores, como la rata arrocerera, el ratón de pastizal, el ratón marrón, entre otros; y aves, como el arrocero americano, el turpial de agua, el tordo arrocero, los torditos, el yaguaso cariblanco, el güiriri y el tejé.

En lo referente a la dinámica poblacional de los roedores, Poleo & Pérez (1999) destacan que

³ La Unidad Productora «Parcela 199» es una unidad de producción primaria de arroz, que está ubicada en Calabozo, estado Guárico, dentro de la poligonal de riego del SRRG.

sus poblaciones tienden a aumentar abruptamente y por ciclos. A las irrupciones poblacionales de los roedores en cultivos se les llama «ratadas»⁴. La rata arrocera (*Holochilus sciureus*) –siendo reconocida como una verdadera plaga del arroz–, es la especie más abundante en cultivos de este rubro en los estados Guárico y Portuguesa, pudiendo llegar a destruir completamente el cultivo de arroz. Esta rata acostumbra roer el tallo de la planta y construir sus nidos con hojas y restos de tallos, a 30 cm sobre la lámina de agua en los cultivos de arroz (Poleo & Pérez, 1999).

El INIA (2004) agrega que existen diversos métodos para controlar estas plagas. En este sentido, la población de roedores puede ser disminuida por medio de depredadores y/o de enfermedades; también puede hacerse a través del uso de raticidas anticoagulantes, de trampas y de métodos culturales, como la eliminación de sus refugios y la implementación de la cacería.

Con respecto a las enfermedades de importancia económica que pueden manifestarse en el cultivo del arroz en el país y que afectan la calidad y cantidad de la cosecha, las más relevantes son la hoja blanca –que es de origen viral– y otras enfermedades de origen fúngico –tales como: la piricularia, el añublo de la vaina, la pudrición de la vaina y el manchado del grano– (INIA, 2004).

• **Cosecha:** según el CIAT (1985), los tipos de cosecha son: manual, mecanizada y semi-mecanizada; en esta última se realiza el trabajo manual combinado con el uso de máquinas que cortan el arroz, para luego trillararlo (separar el grano de la paja) manualmente o mediante la utilización de máquinas trilladoras.

Fraile (2013, comunicación personal), presidente de la Asociación de Productores del Sistema de Riego Río Guárico (APROSIGUA), destaca que en el país la cosecha es totalmente mecanizada.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación fue construido a través del software de simulación Vensim (2014),

⁴ Según Jaksic & Lima (2003, citados por Fuentes, 2012) se puede considerar una *ratada* cuando la densidad de las diversas especies de roedores es mayor a 100 roedores por hectárea o cuando una sola especie tiene una densidad de 50 individuos por hectárea.

basándose en la descripción del sistema real y considerando un conjunto de supuestos, que son expuestos a continuación.

3.1. SUPUESTOS DEL MODELO

• Los factores ecológicos que determinan el buen desarrollo y rendimiento del cultivo, tales como la temperatura, la radiación solar, el agua, el suelo, la humedad relativa y el viento se encuentran en sus valores óptimos durante el período seco. En cambio, durante el período lluvioso, el rendimiento disminuye aproximadamente 45%. En el país los rendimientos son menores en el período lluvioso que en el seco, como consecuencia de la baja incidencia de radiación solar. En este sentido, si se siembra en el período seco, el cultivo recibirá suficiente radiación solar como para la obtención de rendimientos de 10 a 12 t/ha. Pero al sembrar en el período lluvioso la radiación solar es relativamente baja y, por tanto, los rendimientos oscilarán entre 5 y 7 t/ha (Pimentel, 2011).

• El método de acondicionamiento o preparación del terreno no influye sobre el rendimiento del cultivo.

• Las semillas son adquiridas mediante compras a terceros y tienen un porcentaje de germinación superior al 90%. El INIA (2004) señala que si se efectúa la siembra de 130 a 150 kg de semillas/ha, cuyo porcentaje de germinación sea superior a 90%, se puede garantizar el establecimiento de una población óptima (al menos 200 plantas por metro cuadrado).

• Las únicas plagas que afectan el cultivo de arroz son las ratas y los chinches.

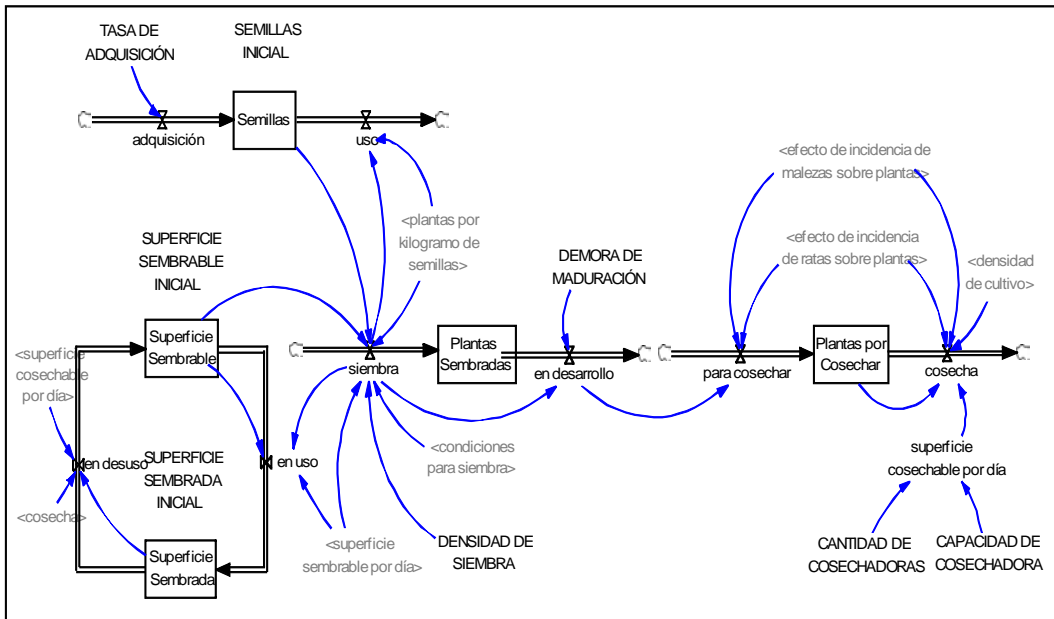
• El productor siempre aplica mecanismos de control efectivos sobre las enfermedades y, por ende, la incidencia de las mismas es solo sobre los costos de producción.

3.2. ESTRUCTURA DEL MODELO

El modelo muestra el proceso de producción de arroz desde la adquisición de semillas hasta el traslado del arroz *paddy* a los molinos. A continuación se presenta una descripción general de la estructura del modelo, explicando las principales variables que la componen. Además, se detallan algunas de las ecuaciones que rigen el modelo. Por razones de espacio, no es posible explicar en detalle todas las estructuras y ecuaciones.

En la Figura N°1 se puede observar la estructura para el cultivo del arroz, que

Figura 1
Estructura para el cultivo del arroz



Fuente: elaboración propia

comprende las etapas del proceso productivo desde la adquisición de semillas hasta la cosecha.

El proceso de cultivo del arroz comienza con la adquisición de los insumos. El nivel *Semillas* (kg) representa la cantidad de semillas que el productor tiene almacenada en su inventario y se calcula a partir de la ecuación (1):

$$\text{Semillas} = \text{INTEG}(\text{adquisición} - \text{uso}, \text{SEMILLAS INICIAL})$$

Este nivel se incrementa a través del flujo de *adquisición* (kg/día) de semillas y decrece mediante el flujo de *uso* (kg/día) de las mismas. La *TASA DE ADQUISICIÓN* (kg/día) tiene un valor constante y el uso depende del valor del flujo *siembra* (plantas/día), el cual expresa la cantidad de plantas sembradas por día. La variable *plantas por kilogramo de semillas* (plantas/kg) se emplea para hacer la conversión entre las plantas sembradas y las semillas usadas.

Por otra parte, el nivel *Plantas Sembradas* (plantas) representa la cantidad de plantas que están sembradas en el terreno y se calcula a través de la ecuación (2):

$$\text{Plantas Sembradas} = \text{INTEG}(\text{IF THEN ELSE}(\text{siembra} > 0, \text{siembra}, \text{IF THEN ELSE}(\text{Plantas Sembradas} - \text{en desarrollo} \leq 0, -\text{en desarrollo}, -\text{Plantas Sembradas})), 0) \quad (2)$$

Este nivel se incrementa mediante el flujo *siembra*, el cual depende directamente de la *Superficie Sembrable* (ha), la *superficie sembrable por día* (ha/día) y la *DENSIDAD DE SIEMBRA* (kg/ha). La variable *plantas por kilogramo de semillas* es utilizada para la estimación de la cantidad de semillas sembradas que se transforman en plantas. La variable *condiciones para siembra* (adimensional) se emplea para verificar el cumplimiento de las condiciones para que empiece el proceso de siembra.

A medida que se siembra, el nivel *Superficie Sembrable* es disminuido por el flujo *en uso* (ha/día). Este flujo incrementa el nivel *Superficie Sembrada* (ha) y, de esta manera, la *Superficie Sembrable* pasa a ser *Superficie Sembrada*. El flujo *en desuso* (ha/día) disminuye la *Superficie Sembrada*, convirtiéndola en *Superficie Sembrable*.

Además, el nivel *Plantas Sembradas* es disminuido mediante el flujo *en desarrollo* (plantas/día) a partir del momento en que las plantas están maduras y, por ende, se inicia el proceso de cosecha. Esto es representado a través de una demora fija llamada *DEMORA DE MADURACIÓN* (día). La variable *en desarrollo* se calcula mediante la ecuación (3):

En desarrollo = DELAY FIXED (siembra, DEMORA DE MADURACIÓN, 0) (3)

El nivel *Plantas por Cosechar* (plantas) representa la cantidad de plantas que se encuentran listas para la cosecha, teniendo como flujo de entrada *para cosechar* (plantas/día) y como flujo de salida *cosecha* (plantas/día). Este nivel se calcula a partir de la ecuación (4):

Plantas por Cosechar = INTEG (para cosechar - cosecha, 0) (4)

El flujo *para cosechar* depende del flujo *en desarrollo*. Además, es afectado por las variables *efecto de incidencia de ratas sobre plantas* (adimensional) y *efecto de incidencia de malezas sobre plantas* (adimensional), las cuales representan los daños producidos a las plantas por las ratas y malezas que afectaron el cultivo. Este flujo se calcula a través de la ecuación (5):

Para cosechar = en desarrollo × efecto de incidencia de ratas sobre plantas × efecto de incidencia de malezas sobre plantas (5)

El flujo *cosecha* (plantas/día) indica la cantidad de plantas cosechadas diariamente y se estima a través de las variables *densidad de cultivo* (plantas/ha), *superficie cosechable por día* (ha/día), *efecto de incidencia de ratas sobre plantas* y *efecto de incidencia de malezas sobre plantas*.

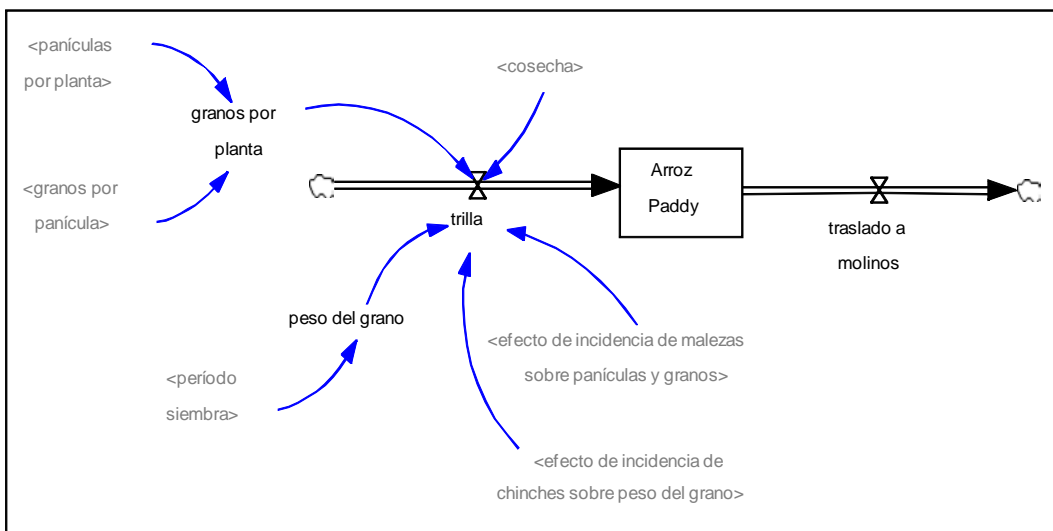
La variable *superficie cosechable por día* depende de la *CANTIDAD DE COSECHADORAS* (cosechadoras) y la *CAPACIDAD DE COSECHADORA* (ha/cosechadoras × día).

De esta manera culmina el proceso de cultivo del arroz. Seguidamente a la recolección de las plantas en el terreno se procede a la trilla o separación del grano de la paja, para luego trasladarlo a los molinos. En la Figura Nº 2 se muestra la estructura de estos últimos procesos.

El nivel *Arroz Paddy* (kg) representa la cantidad de granos de arroz cosechados. El flujo *trilla* (kg/día) incrementa este nivel, mientras que el flujo *traslado a molinos* (kg/día) lo disminuye. La variable *trilla* es calculada mediante la multiplicación de las variables *cosecha* (plantas/día), *granos por planta* (granos/plantas), *peso del grano* (kg/granos), *efecto de incidencia de chinches sobre peso del grano* (adimensional) y *efecto de incidencia de malezas sobre panículas y granos* (adimensional).

Para calcular el valor de la variable *rendimiento período lluvioso* se divide el valor del nivel *Producción Período Lluvioso* (kg), el cual representa la cantidad total de arroz *paddy* obtenido luego del proceso de trillado durante el período de lluvias, entre la constante *SUPERFICIE SEMBRABLE INICIAL* (ha). La variable *rendimiento período seco* se calcula de manera análoga.

Figura 2 Estructura para la trilla y el traslado a molinos



Fuente: elaboración propia

Ahora bien, las estructuras presentadas en las Figuras N° 1 y 2 contienen ciertas variables que permiten incorporar el efecto de incidencia de plagas y malezas sobre el cultivo, las cuales son: *efecto de incidencia de ratas sobre plantas, efecto de incidencia de chinches sobre peso del grano, efecto de incidencia de malezas sobre plantas y efecto de incidencia de malezas sobre panículas y granos*. A continuación se especifica cómo se calculan dichas variables, describiendo aspectos acerca de la actuación de las plagas y malezas en el cultivo y las medidas de control tomadas por el productor.

La variable *efecto de incidencia de ratas sobre plantas* depende del período de siembra, de los parámetros *INCIDENCIA DE RATAS PERÍODO LLUVIOSO* (adimensional) e *INCIDENCIA DE RATAS PERÍODO SECO* (adimensional) y de las variables *fracción de daño por ratas período lluvioso* (adimensional) y *fracción de daño por ratas período seco* (adimensional). A su vez, la variable *fracción de daño por ratas período lluvioso* depende del nivel *Máxima Densidad de Ratas Período Lluvioso* (ratas/ha). Cuando esta última variable alcanza el valor de la constante *RATADA* (ratas/ha), ha llegado a un punto en que las ratas generan daños significativos al cultivo. La variable *fracción de daño por ratas período seco* se calcula

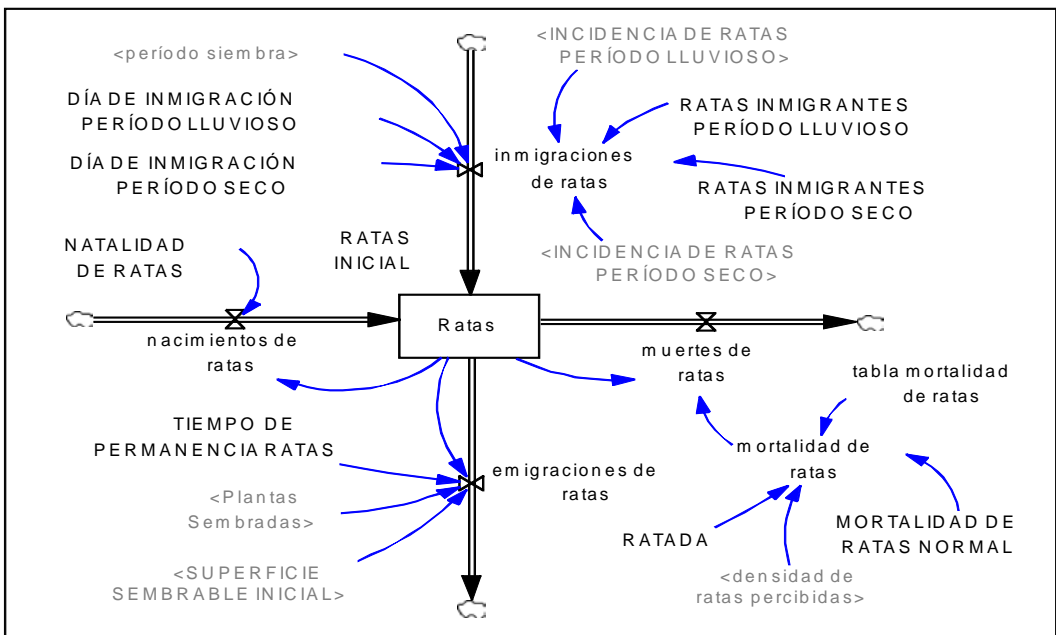
de manera análoga. La fracción de daño puede alcanzar valores diferentes dependiendo de la *SUPERFICIE SEMBRABLE INICIAL*. Las ratas pueden destruir completamente el cultivo a los pequeños y medianos productores, sin embargo, jamás llegan a causar la destrucción total del cultivo de los grandes productores.

En lo referente al control de las ratas que afectan el cultivo, en la Figura N° 3 se muestra la estructura utilizada para el mismo. A continuación se describirán los elementos empleados para generar la dinámica poblacional de las ratas dentro de la parcela.

El nivel *Ratas* (ratas) se incrementa a través de los flujos *nacimientos de ratas* (ratas/día) e *inmigraciones de ratas* (ratas/día) y decrece mediante los flujos *muerdes de ratas* (ratas/día) y *emigraciones de ratas* (ratas/día).

Los *nacimientos de ratas* dependen del nivel *Ratas* y de la constante *NATALIDAD DE RATAS* (1/día), mientras que las *muerdes de ratas* dependen tanto de la cantidad de ratas en la parcela como de la variable *mortalidad de ratas* (1/día). La *mortalidad de ratas* se define a través del multiplicador *tabla mortalidad de ratas* (adimensional) y la constante *MORTALIDAD DE RATAS NORMAL* (1/día). Dicha tabla incorpora el efecto de la densidad de ratas que

Figura 3
Estructura para el control de las ratas



Fuente: elaboración propia

percibe el productor sobre las muertes de las mismas. Cuando la *densidad de ratas percibidas* iguala o sobrepasa el valor de *RATADA*, la mortalidad es incrementada con respecto a la *MORTALIDAD DE RATAS NORMAL*, que representa las muertes por causas naturales. Este incremento se debe a la incorporación de medidas de control por parte del productor para disminuir la cantidad de ratas en su parcela.

La *densidad de ratas percibidas* depende de la variable *ratas percibidas*, la cual representa la cantidad de ratas que percibe el productor mediante una demora de información de tercer orden y depende del nivel *Ratas* y de la constante *TIEMPO EN PERCIBIR RATAS* (día).

Por otra parte, las *inmigraciones de ratas* representan la llegada de una cantidad significativa de ratas a la parcela, provocando un incremento en la población de las mismas y se define mediante una función PULSO. Las *emigraciones de ratas* causan un decrecimiento en la población y representan el traslado de las ratas hacia otras parcelas en búsqueda de alimentos en el momento en que la cantidad de *Plantas Sembradas*, en relación con la *SUPERFICIE SEMBRABLE INICIAL*, alcanza un valor crítico. Este traslado tiene una demora, representada por la constante *TIEMPO DE PERMANENCIA RATAS* (día).

Las variables *efecto de incidencia de chinches sobre peso del grano*, *efecto de incidencia de malezas sobre plantas* y *efecto de incidencia de malezas sobre panículas y granos* se calculan de manera similar a la variable *efecto de incidencia de ratas sobre plantas*.

Además, el modelo está conformado por estructuras para el control de los chinches y de las malezas. La variable *Densidad de Chinches* (chinches/ha) es un nivel que representa la cantidad de chinches encontrados en la parcela, por hectárea. Dicho nivel es incrementado mediante los flujos *nacimientos de chinches* [chinches/(día × ha)] e *inmigraciones de chinches* [chinches/(día × ha)] y es disminuido a través de los flujos *muertes de chinches* (chinches/(día × ha)) y *emigraciones de chinches* [chinches/(día × ha)]. Por otra parte, el nivel *Malezas* (plantas) representa la cantidad de plantas no deseadas dentro del cultivo. Este nivel aumenta a través de la *emergencia* (plantas/día) de las mismas y decrece mediante sus flujos de salida *deshierbe* (plantas/día) y *extracción por*

cosecha (plantas/día).

En el Cuadro N° 1 se presenta un resumen de las principales variables que intervienen en el modelo.

3.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Ante la ausencia de datos numéricos históricos de la productora en estudio, algunos de los valores asignados a los parámetros fueron obtenidos directamente a través de consultas a expertos y fuentes bibliográficas, otros fueron calculados a partir de un conjunto de datos encontrados en la literatura y los demás fueron calibrados con el fin de generar la respuesta esperada del modelo. Para la calibración o ajuste se realizaron diversas simulaciones, variando el valor de cada uno de los parámetros y asignando finalmente los valores considerados más apropiados. En el Cuadro N° 2 se presenta un resumen de los principales parámetros que intervienen en el modelo.

4. SIMULACIÓN BASE

En el modelo se utilizó el «día» como unidad de tiempo de simulación. La corrida base se realizó para un período de 212 días, representando el proceso productivo en el período seco (octubre-abril), el cual es análogo al que se lleva a cabo en el período lluvioso (mayo-septiembre), con la diferencia de que en este último, los rendimientos son menores debido a la baja incidencia de radiación solar. Además, se realizó una corrida para ambos períodos, es decir, 365 días. Con respecto al método de integración, se utilizó el de *Runge-Kutta* de segundo orden automático, con un tamaño de paso de 0,0625. El proceso de selección de este método de integración y tamaño de paso se explica en la sección 5. En la corrida base se considera que no hay incidencia de enfermedades, plagas ni malezas.

El Gráfico N° 1a muestra el comportamiento del nivel *Plantas Sembradas* en el período de sequía. Comenzando desde cero, la cantidad de plantas aumenta a medida que se lleva a cabo la siembra; una vez culminada esta, el nivel alcanza el valor de 225 millones de plantas y se mantiene hasta el momento en que se inicia la recolección de las mismas. Al terminar el proceso de cosecha este nivel llega al valor de cero plantas. Dicho nivel representa la cantidad de plantas que fueron sembradas y que permanecen en esa condición a lo largo del cultivo. El modelo se

Cuadro 1
Resumen de las principales variables que intervienen en el modelo

Variable	Tipo	Unidades
<i>adquisición</i>	Flujo	kg/día
<i>Arroz Paddy</i>	Nivel	kg
<i>condiciones para siembra</i>	Auxiliar	adimensional
<i>cosecha</i>	Flujo	plantas/día
<i>Densidad de Chinchés</i>	Nivel	chinchés/ha
<i>densidad de cultivo</i>	Auxiliar	plantas/ha
<i>densidad de ratas percibidas</i>	Auxiliar	ratas/ha
<i>deshierbe</i>	Flujo	plantas/día
<i>efecto de incidencia de chinchés sobre peso del grano</i>	Auxiliar	adimensional
<i>efecto de incidencia de chinchés sobre peso del grano</i>	Auxiliar	adimensional
<i>efecto de incidencia de malezas sobre panículas y granos</i>	Auxiliar	adimensional
<i>efecto de incidencia de malezas sobre panículas y granos</i>	Auxiliar	adimensional
<i>efecto de incidencia de malezas sobre plantas</i>	Auxiliar	adimensional
<i>efecto de incidencia de ratas sobre plantas</i>	Auxiliar	adimensional
<i>emergencia</i>	Flujo	plantas/día
<i>emigraciones de chinchés</i>	Flujo	chinchés/(día x ha)
<i>emigraciones de ratas</i>	Flujo	ratas/día
<i>en desarrollo</i>	Flujo	plantas/día
<i>en desuso</i>	Flujo	ha/día
<i>en uso</i>	Flujo	ha/día
<i>extracción por cosecha</i>	Flujo	plantas/día
<i>granos por planta</i>	Auxiliar	granos/plantas
<i>inmigraciones de chinchés</i>	Flujo	chinchés/(día x ha)
<i>inmigraciones de ratas</i>	Flujo	ratas/día
<i>Malezas</i>	Nivel	plantas
<i>mortalidad de ratas</i>	Auxiliar	1/día
<i>muertes de chinchés</i>	Flujo	chinchés/(día x ha)
<i>muertes de ratas</i>	Flujo	ratas/día
<i>nacimientos de chinchés</i>	Flujo	chinchés/(día x ha)
<i>nacimientos de ratas</i>	Flujo	ratas/día
<i>para cosechar</i>	Flujo	plantas/día
<i>peso del grano</i>	Auxiliar	kg/granos
<i>Plantas por Cosechar</i>	Nivel	plantas
<i>plantas por kilogramo de semillas</i>	Auxiliar	plantas/kg
<i>Plantas Sembradas</i>	Nivel	plantas
<i>Ratas</i>	Nivel	ratas
<i>rendimiento período lluvioso</i>	Auxiliar	kg/ha
<i>rendimiento período seco</i>	Auxiliar	kg/ha
<i>Semillas</i>	Nivel	kg
<i>siembra</i>	Flujo	plantas/día
<i>superficie cosechable por día</i>	Auxiliar	ha/día
<i>Superficie Sembrable</i>	Nivel	ha
<i>superficie sembrable por día</i>	Flujo	ha/día
<i>Superficie Sembrada</i>	Nivel	ha
<i>traslado a molinos</i>	Flujo	kg/día
<i>trilla</i>	Flujo	kg/día
<i>uso</i>	Flujo	kg/día

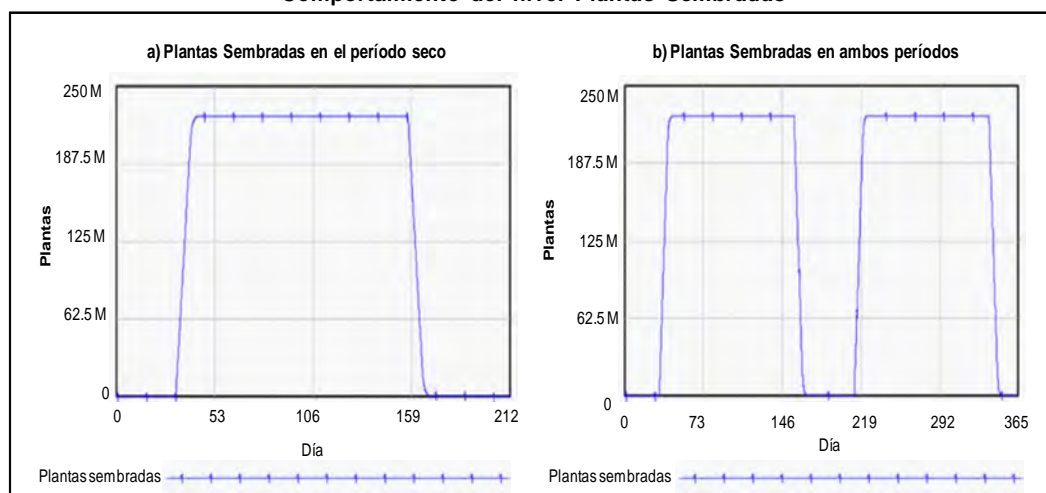
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

Cuadro 2
Resumen de los principales parámetros que intervienen en el modelo

Parámetro	Valor	Unidades
CANTIDAD DE COSECHADORAS	2	cosechadoras
CAPACIDAD DE COSECHADORA	6	ha/(cosechadoras x día)
DEMORA DE MADURACIÓN	125	día
DENSIDAD DE SIEMBRA	80	kg/ha
MORTALIDAD DE RATAS NORMAL	0,045	1/día
NATALIDAD DE RATAS	0,14	1/día
RATADA	50	ratas/ha
SUPERFICIE SEMBRABLE INICIAL	120	ha
TASA DE ADQUISICIÓN	0	kg/día
TIEMPO DE PERMANENCIA RATAS	2	día

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

Gráfico 1
Comportamiento del nivel *Plantas Sembradas*



Fuente: elaboración propia

construyó bajo el supuesto de que lo que se siembra es lo que se recolecta, tomando en cuenta el efecto que tienen las plagas y malezas sobre las plantas exclusivamente en el momento de la cosecha (efecto acumulado durante el desarrollo de las plantas), ya que es de interés estudiar el efecto total al final del cultivo (y no día a día). En el Gráfico N° 1b se muestra el comportamiento del nivel *Plantas Sembradas* en ambos periodos.

5. VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo fue validado con la ayuda de expertos vinculados con el sector arrocerero del país y a través de la aplicación de diversas pruebas para generar confianza en el mismo. En esta sección

se presenta una descripción del conjunto de pruebas aplicadas para validar y verificar el modelo, de acuerdo con lo expuesto en Mazzola (2012). La prueba de reproducción de comportamiento no se incluyó en el estudio por falta de datos históricos del comportamiento del sistema real.

- **Verificación estructural:** a través de la inspección de las estructuras del modelo se verificó que no se presentan violaciones de las leyes físicas, tales como la conservación de la materia y la «no negatividad» de los niveles que representan poblaciones e inventarios.

- **Consistencia dimensional:** se comprobó la consistencia dimensional utilizando la opción «Units check» del software Vensim,

Cuadro 3
Resumen de los principales resultados del análisis de sensibilidad

Parámetro	Valores del rango	Porcentaje de cambio	Efecto en <i>rendimiento período lluvioso</i>	Efecto en <i>rendimiento período seco</i>
<i>DÍA DE INMIGRACIÓN PERÍODO LLUVIOSO</i>	240	-17%	0%	0%
	365	27%	33%	0%
<i>DÍA DE INMIGRACIÓN PERÍODO SECO</i>	90	-16%	0%	0%
	212	98%	0%	25%
<i>DURACIÓN EFECTO RESIDUAL INSECTICIDA PERÍODO LLUVIOSO</i>	5	-83%	-13%	0%
	45	50%	0%	0%
<i>EFECTO DE INSECTICIDA PERÍODO LLUVIOSO INICIAL</i>	1,5	-69%	-69%	0%
	6	25%	0%	0%
<i>RATAS INMIGRANTES PERÍODO LLUVIOSO</i>	0	-100%	33%	0%
	$1,2 \times 10^4$	100%	-30%	0%
<i>RATAS INMIGRANTES PERÍODO SECO</i>	0	-100%	0%	25%
	$1,2 \times 10^4$	147%	0%	-35%

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

en distintas etapas del proceso de construcción del modelo. Además, a través de la inspección visual de las ecuaciones del modelo, se verificó que todos los parámetros tuvieran unidades acordes con el sistema real y nombres adecuados.

Error de integración: una vez construido el modelo, se determinó cual método de integración y tamaño de paso del tiempo son apropiados para que el modelo presente una solución numérica correcta. Esto se definió a través de la evaluación de dicha solución, mediante el software Vensim, variando los métodos de integración y el valor del tamaño de paso del tiempo. Finalmente, se decidió utilizar el método de integración de *Runge-Kutta* de segundo orden automático, con tamaño de paso de 0,0625. Este método es más preciso que el de Euler y a veces es más rápido que el de *Runge-Kutta* de cuarto orden automático.

• **Condiciones extremas:** se verificó la robustez del modelo a través de la asignación de valores extremos a los parámetros y de la posterior simulación y evaluación de la respuesta generada por las ecuaciones del mismo. El modelo se ejecutó correctamente en todos los casos.

• **Análisis de sensibilidad de parámetros:** se estudió la respuesta del modelo ante pequeños cambios realizados en los valores de algunos de sus parámetros, dentro de un rango plausible. Específicamente se seleccionaron -para realizar el análisis- los parámetros que fueron

calibrados, con la excepción de aquellos que solamente toman valores binarios. Se calculó el efecto que tiene la variación de dichos parámetros sobre las variables *rendimiento período lluvioso* y *rendimiento período seco*, las cuales se consideran las principales variables del modelo. En el Cuadro N° 3 se presenta el resumen de los principales resultados obtenidos mediante el análisis de sensibilidad. Se pueden observar los valores límite del rango de incertidumbre establecido para cada parámetro en estudio, el porcentaje de cambio que representan estos valores límite con respecto al valor asignado al parámetro y el efecto que tiene la variación sobre el rendimiento.

Los resultados obtenidos en el análisis indican que el modelo es sensible a las variaciones de los parámetros *EFECTO DE INSECTICIDA PERÍODO LLUVIOSO INICIAL*, *DURACIÓN EFECTO RESIDUAL INSECTICIDA PERÍODO LLUVIOSO*, *DÍA DE INMIGRACIÓN PERÍODO LLUVIOSO*, *DÍA DE INMIGRACIÓN PERÍODO SECO*, *RATAS INMIGRANTES PERÍODO LLUVIOSO* y *RATAS INMIGRANTES PERÍODO SECO* y, en menor grado, de los parámetros *TIEMPO EN PERCIBIR CHINCHES* y *TIEMPO EN PERCIBIR RATAS*. Por ejemplo, al reducir en un 83% el valor del parámetro *DURACIÓN EFECTO RESIDUAL INSECTICIDA PERÍODO LLUVIOSO*, disminuye en un 13% el valor de la variable *rendimiento período*

Cuadro 4
Resumen de rendimiento en ambos períodos con incidencia de ratas, chinches y/o malezas sobre el cultivo

Incidencia	Rendimiento período seco (kg/ha)	Rendimiento período lluvioso (kg/ha)	Variación porcentual período seco	Variación porcentual período lluvioso
Sin incidencia de plagas ni malezas	13.620	7.485	0%	0%
Con incidencia de ratas	10.908	5.629	-20 %	-25 %
Con incidencia de chinches	12.978	6.802	-5 %	-9 %
Con incidencia de malezas	8.896	4.889	-35 %	-35 %
Con incidencia de ratas y chinches	10.394	5.116	-24 %	-32 %
Con incidencia de ratas y malezas	7.125	3.677	-48 %	-51 %
Con incidencia de chinches y malezas	8.477	4.443	-38 %	-41 %
Con incidencia de ratas, chinches y malezas	6.789	3.341	-50 %	-55 %

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

lluvioso, debido al gran crecimiento de la población de chinches como consecuencia de la poca duración del efecto del insecticida.

6. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Para la simulación base se considera la situación ideal en que no hay incidencia de enfermedades, plagas ni malezas sobre el cultivo. En esta sección se estudia un conjunto de escenarios de interés, que pudieran presentarse en el sistema real.

• **Escenario 1: Si durante el mismo período hay incidencia⁵ de ratas, chinches y/o malezas sobre el cultivo, ¿cómo se vería afectado el rendimiento?**

En el Cuadro N° 4 se muestra un resumen de los valores de rendimiento alcanzados en los períodos seco y lluvioso, con incidencia de ratas, chinches y/o malezas. En esta Cuadro también se incluye, con fines comparativos, la variación porcentual, con respecto a los valores de rendimiento para el caso de que no haya incidencia de plagas ni malezas.

Los resultados mostrados en el Cuadro N° 4 evidencian los potenciales efectos que podrían tener la incidencia individual y conjunta de ratas, chinches y malezas sobre el rendimiento del

⁵ Se dice que hay incidencia cuando la infestación o invasión al cultivo por parte de plagas y/o malezas repercute sobre la producción y, por ende, sobre el rendimiento agrícola. También se considera el impacto en los costos de producción, debido a la aplicación de medidas de control que se emplean para disminuir las poblaciones de dichos agentes biológicos.

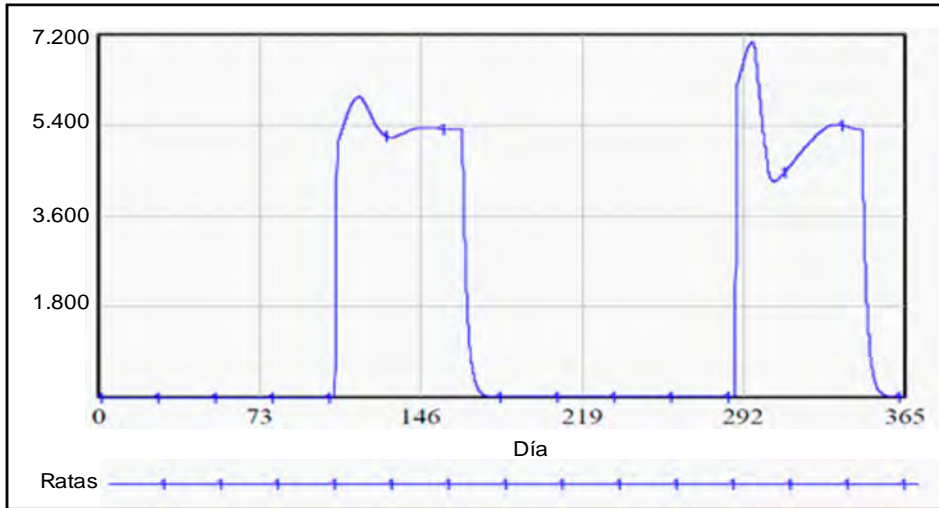
cultivo. Los productores deben actuar de manera proactiva y oportuna en la toma de medidas de control, ya que los efectos que estos agentes biológicos producen al cultivo pueden alcanzar magnitudes considerables. Dado que siempre se presentarán incidencias de este tipo -en mayor o menor medida- no se pueden conseguir los rendimientos ideales, pero sí se podrían alcanzar rendimientos cercanos, siempre y cuando se haga una gestión efectiva de control de plagas y malezas.

• **Escenario 2: Si en la unidad productora ocurre la incidencia de plagas y malezas en distintas magnitudes: leve, moderada y/o elevada, ¿cómo se vería afectada la producción y el rendimiento?**

Se ejecutó el modelo con la siguiente configuración para cada uno de los períodos: i) moderada incidencia de chinches, leve incidencia de ratas y moderada incidencia de malezas, para el período seco; y, ii) elevada incidencia de chinches, elevada incidencia de ratas y moderada incidencia de malezas, para el período lluvioso. Se obtuvo como resultado -en el período seco- un volumen de producción de 1.173.000 kg y un rendimiento de 9.773 kg/ha, mientras que para el período lluvioso el volumen de producción fue de 542.360 kg y el rendimiento de 4.520 kg/ha.

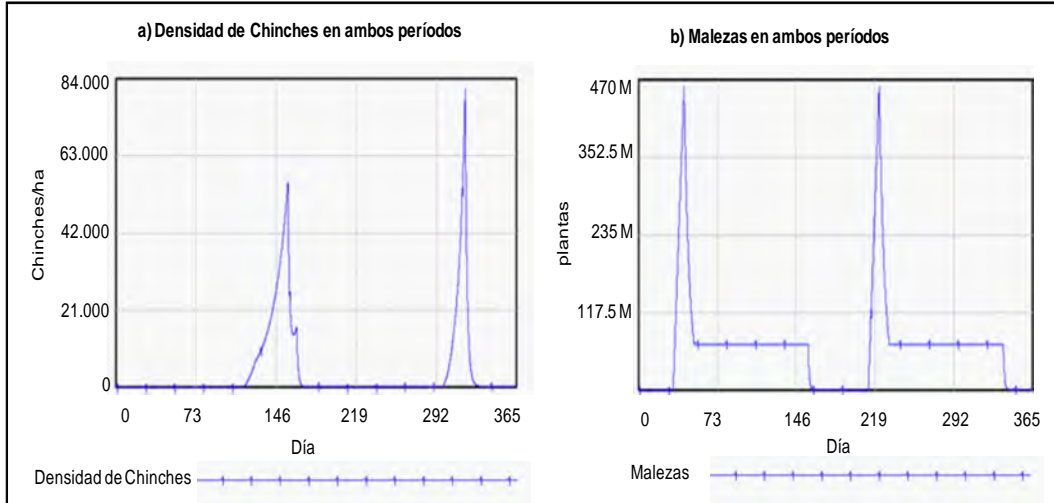
En el Gráfico N° 2 se puede observar el comportamiento del nivel *Ratas* en ambos períodos. En el período seco la cantidad de ratas es tan baja (incidencia leve), que nunca se alcanza el umbral poblacional (6.000 ratas), por lo cual el productor no ejerce medidas contra esta plaga.

Gráfico 2
Comportamiento del nivel Ratas en ambos períodos, con la configuración establecida para el escenario 2



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

Gráfico 3
Comportamiento de los niveles Densidad de Chinchas y Malezas en ambos períodos, con la configuración establecida para el escenario 2



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

Así, su población aumenta hasta el momento de la cosecha, cuando finalmente emigra del cultivo. Por otra parte, al inicio del período lluvioso no existen ratas en el cultivo. Luego, la población tiene un gran crecimiento debido a la inmigración de ratas y a partir de este momento, comienza a aumentar a medida que ellas se

reproducen. La población disminuye como efecto de los mecanismos de control que ejerce el productor y posteriormente, por causa de las emigraciones que se producen durante el proceso de cosecha, alcanza un valor de cero ratas al finalizar la simulación.

El Gráfico N° 3a muestra el comportamiento del nivel *Densidad de Chinchas* en ambos períodos. Al inicio de cada período esta variable tiene el valor de cero, hasta que los chinches comienzan a inmigrar hacia el cultivo al iniciar la etapa de floración. La población aumenta hasta el momento en que el productor percibe que la densidad de chinches ha llegado a su umbral permitido y, por ende, aplica el insecticida. El efecto residual del insecticida permite mantener la población baja hasta que los chinches restantes emigran del cultivo, durante la cosecha. Finalmente, la densidad poblacional alcanza el valor de cero. Por otra parte, en el Gráfico N° 3b se puede observar el comportamiento del nivel *Malezas* en ambos períodos. Esta variable se incrementa al inicio de la siembra. Posteriormente (10 días después de la siembra), las malezas se controlan a través de la aplicación de un herbicida *postemergente* con 85% de efectividad, disminuyendo así la población. Las plantas restantes son extraídas en el momento de la cosecha.

• **Escenario 3: Si se desea representar una productora pequeña haciendo uso del modelo genérico, ¿cuál sería el ajuste de parámetros correspondiente y cómo se vería afectada la producción?**

Una vez hecho el ajuste de parámetros para representar una pequeña productora, cuyo tamaño se considera de 20 ha, el modelo se ejecutó correctamente; todas las gráficas mostraron el comportamiento esperado. Además, al comparar los resultados obtenidos con los volúmenes de producción señalados por 14 pequeños productores encuestados -cuyas productoras poseen un tamaño promedio de 24 ha, con una desviación de 4 ha-, se puede afirmar que dichos resultados son acertados ya que pertenecen al mismo orden de magnitud. De

acuerdo con los datos suministrados por dichos productores se determinó que, en promedio, sus volúmenes de producción obtenidos oscilaron alrededor de 154.951 kg, con una desviación de 62.027 kg (Ramírez, Mejías, Mora & Mayoral, 2013). Los resultados demuestran que el modelo construido es perfectamente aplicable cuando se consideran productoras de distinto tamaño, lo cual avala el carácter genérico del mismo.

• **Escenario 4: ¿Qué pasaría si el productor siembra a densidades inferiores o superiores a la recomendada?**

El mecanismo de siembra que el productor utiliza actualmente es el de siembra directa con sembradora, para el cual se recomienda calibrar el equipo para que la densidad de siembra oscile alrededor de 85 kg/ha; la cantidad de semillas debe variar en el rango de 70 a 100 kg/ha. En el Cuadro N° 5 se muestra el resumen de los resultados obtenidos al variar en ciertos porcentajes la densidad de siembra utilizada y chequear el efecto que tiene la variación sobre el rendimiento en ambos períodos, tomando como referencia los valores de rendimiento obtenidos en la simulación base (sin incidencia de plagas ni enfermedades), con una densidad de siembra de 80 kg/ha.

Para obtener una densidad de cultivo óptima se recomienda utilizar una densidad de siembra de 85 kg/ha. Sin embargo, si se siembra en el rango de 70 a 100 kg/ha, el rendimiento no varía en gran porcentaje. Si la densidad de siembra utilizada está fuera de dicho rango, la disminución del rendimiento es significativa. El INIA, el CIAT y el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) destacan que algunos productores tienen la creencia de que a mayor cantidad de semillas mayores rendimientos, pero esto no siempre se cumple (INIA, CIAT & FLAR, 2011). Al excederse esta cantidad de los

Cuadro 5
Efecto de la variación de la densidad de siembra sobre el rendimiento

Densidad de siembra	Variación porcentual	Efecto en rendimiento (ambos períodos)
50 kg/ha	-38%	-25%
70 kg/ha	-13%	-4%
80 kg/ha	0%	0%
85 kg/ha	6%	0,28%
100 kg/ha	25%	-6%
120 kg/ha	50%	-25%

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la investigación

límites recomendados, el rendimiento tiende a disminuir como consecuencia de la competencia entre las plantas de arroz (Páez, 1991).

7. CONCLUSIONES

Como resultado del análisis de varios escenarios considerados de interés, se pudieron observar las variaciones que se presentan en el rendimiento del cultivo al ser afectado en distintas magnitudes por diversos agentes biológicos que lo atacan de manera específica. Se evidenciaron los potenciales efectos que podrían tener la incidencia individual y conjunta de ratas, chinches y malezas, causando mermas considerables en el rendimiento, dependiendo de las magnitudes de incidencia. Por ejemplo, con la incidencia conjunta de ambas plagas y malezas, el rendimiento puede llegar a disminuir en un 55%. Para alcanzar rendimientos cercanos a los ideales (aproximadamente 13.620 kg/ha durante el período seco y 7.485 kg/ha en el período lluvioso), es necesario una gestión efectiva de control de plagas y malezas por parte del productor.

Por otra parte, el análisis ratificó el carácter genérico del modelo, el cual permite su adecuación a cualquier productora de arroz a través de ajustes a los parámetros pertinentes, lo cual fue comprobado al representar una pequeña productora. Se determinaron los parámetros que deben ser calibrados y de qué manera debe hacerse, a fin de representar el proceso productivo del arroz, independientemente del tamaño de la unidad productora.

El análisis del último escenario planteado permitió confirmar lo expuesto en la literatura especializada del sector arrocero, acerca de una situación de suma importancia que repercute significativamente en la producción, relativa a las variaciones de la densidad de siembra y su efecto en el rendimiento del cultivo. Al estudiar los resultados obtenidos se puede afirmar que si el productor utiliza una densidad de siembra recomendada, obtendrá valores óptimos de rendimiento; en contraste, si siembra a densidades inferiores o superiores a la misma, el rendimiento será menor. Por ejemplo, particularmente el responsable de la Unidad Productora identificada como «Parcela 199» podría tener una disminución del 25% del rendimiento si aumenta en un 50% su densidad

de siembra o si la disminuye en un 38%. Este escenario también se puede considerar como una prueba de validación del modelo ante valores extremos de densidades de siembra, lo cual constata la robustez del mismo en lo referente a este importante aspecto.

Se recomienda plantear y analizar nuevos escenarios, que sumados a los expuestos en el trabajo, permitan generar políticas que conlleven al incremento de la producción. Además, el modelo puede ser mejorado y ampliado en distintos aspectos, tales como:

- Incluir el efecto de las siembras tardías sobre el rendimiento del cultivo.
- Representar la toma de decisiones del productor endógenamente, referida a la superficie destinada para la siembra del arroz, al evaluar los resultados del proceso productivo durante varios períodos consecutivos.
- Modelar los aspectos económicos del proceso productivo, incluyendo estructuras para el cálculo de los costos de producción, ingresos y beneficio para ambos períodos.

8. AGRADECIMIENTOS

A los productores, personas y asociaciones vinculadas con el sector arrocero del país que contribuyeron con este trabajo, especialmente los miembros de la Unidad Productora «Parcela 199», por su amabilidad y excelente atención.

Al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico Tecnológico y de las Artes (CDCHTA) de la Universidad de Los Andes y al Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (ONCTI) del Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Innovación, por haber financiado parcialmente este trabajo bajo los proyectos I-1359-13-02-F y PEII N° 2011001338, respectivamente.

REFERENCIAS

-
- Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. (1985). *Arroz: investigación y producción*. Cali: CIAT (Referencia de los cursos de capacitación sobre arroz dictados por CIAT).

- Contreras, A. (2011). *Producción de arroz se recuperó 20% en 2011*. Recuperado de <http://www.eluniversal.com/economia/111221/produccion-de-arroz-se-recupero-20-en-2011>
- Contreras, A. (2014). *Producción de arroz está 1,6% por debajo de 2008*. Recuperado de <http://www.eluniversal.com/economia/140116/produccion-de-arroz-esta-16-pordebajo-de-2008>
- Federación Venezolana de Asociaciones de Productores de Arroz, Fevearroz. (2010). *El arroz en Venezuela*. Recuperado de <http://www.innovaven.org/quepasa/agrosec9.pdf>
- Forrester, J. (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge: Productivity Press.
- Fuentes, L. (2012). *Comportamiento poblacional de la rata arrocera Holochilus sciureus (Rodentia: Cricetidae) en una unidad de producción de arroz del estado Portuguesa*. (Proyecto de grado inédito). Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay.
- Instituto Nacional de Estadísticas, INE. (2014). *Consumo aparente diario per cápita, según producto, Primer semestre 2010 al Segundo semestre 2011*. Recuperado de http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&id=458&Itemid=38;tmpl=component
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIA. (2004). *El cultivo del arroz en Venezuela*. Maracay: Alfredo Romero S.
- INIA, CIAT & FLAR (2011). Efectos de la densidad de siembra y fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de granos de arroz del cultivar centauero en Venezuela. *Agronomía Tropical*, 61(1), 15-26.
- Martínez, P. (1998). *Situación del cultivo del arroz en Venezuela*. Caracas: Fundación Polar.
- Mazzola, J. (2012). *Una revisión de los métodos de validación en dinámica de sistemas*. (Proyecto de grado inédito). Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Mejías, I. (2014). *Un modelo de simulación genérico de una productora de arroz venezolana*. (Proyecto de grado inédito). Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Molina, L. (1998). Notas sobre la situación de la producción primaria de arroz en Venezuela. *Agroalimentaria*, 6, 45-55.
- Molina, L. (1999). Permanencia Campesina en la producción de arroz en un contexto de orientación neoliberal en Venezuela (1989-1998). *Agroalimentaria*, 5(9), 23-39.
- Páez, O. (1991). El cultivo del arroz densidad de siembra, control de malezas y fertilización. *FONAIAP DIVÚLGA*, 36.
- Pimentel, X. (2011). *Análisis Técnico-económico del sistema de siembra directa del cultivo de arroz en los productores asociados de Asoportuguesa; municipio Esteller estado Portuguesa*. (Trabajo de grado inédito). Universidad Centrocidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela.
- Piñate, P. (2009). *Fuerte caída de la producción agrícola confirma Fedegro*. Recuperado de <http://agronotas.wordpress.com/2009/12/17/fedegro-3>
- Poleo, C. & Pérez, N. (1999). *Aspectos biológicos de la rata arrocera*. Recuperado de http://sian.inia.gov.ve/repositorio/revistas_tec/FonaiapDivulga/fd62/rata.html
- Ramírez, V., Mejías, I., Mora, E. & Mayoral, R. (2013). *Desarrollo de un modelo de simulación de la producción, importación-exportación y consumo de arroz en Venezuela como herramienta para la planificación y toma de decisiones tanto gubernamental como de productores*. Mérida (Venezuela): Universidad de Los Andes, Proyecto ONCTI PEII.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. New York: McGraw-Hill.
- Vensim (2014). *Ventana Systems, Inc*. Recuperado de <http://www.vensim.com/>

