

## Modelo informático para la construcción de doseles virtuales de fresa\*

### Computational model to build virtual canopies of strawberry

María Luisa España Boquera<sup>1</sup>, Omar Champo Jiménez<sup>1</sup>, Philippe Lobit<sup>1</sup>, Fernando Arellano<sup>1</sup> y Raúl Cárdenas Navarro<sup>1§</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posta Veterinaria, carretera Morelia-Zinapécuaro, Michoacán, km 4.5, C. P. 58880 Tel: 443 3225500 Ext. 5230. (mespanaboquera@gmail.com; omar.champo@gmail.com; plobit@gmail.com; fersito@gmail.com; rcardenasnavarro@gmail.com). §Autor para correspondencia: rcardenasnavarro@gmail.com.

#### Resumen

Los doseles virtuales se utilizan en modelos ecofisiológicos para estudiar el funcionamiento de las plantas. El propósito de este trabajo fue desarrollar un modelo informático para construir doseles virtuales de plantas de fresa y evaluar la habilidad de éstos para simular la radiación interceptada (aproximada con la fracción de huecos), fundamental para los procesos de fotosíntesis y transpiración. El modelo representa cada planta como un conjunto de hojas, a partir de la superficie promedio de su foliolo central, el número promedio de hojas por planta y la geometría de plantación. La relación entre las dimensiones de los foliolos y el pecíolo siguen funciones normales de distribución, ajustadas con datos de campo. Los datos se obtuvieron en tres áreas de muestreo de 1 m<sup>2</sup>, de una parcela de producción, donde las hojas se midieron en cuatro tiempos para simular diferentes densidades de vegetación. Simultáneamente, se tomaron fotografías desde ángulos de iluminación de 0°, 15° y 30°, para medir la fracción de huecos cerca del nadir, para estimar la luz interceptada por las hojas alrededor del mediodía solar. Se utilizó el modelo para construir doseles virtuales equivalentes a los medidos en campo. Se calcularon correlaciones lineales entre la fracción de huecos (desde cada ángulo de iluminación) de los doseles reales (fotografías)

#### Abstract

Virtual canopies are used in ecophysiological models to study how plants work. The purpose of this work was to develop a computer model to build virtual canopies of strawberry plants and evaluate the ability of these to simulate intercepted radiation (approximated with the void fraction), fundamental to the processes of photosynthesis and transpiration. The model represents each plant as a set of sheets, from the average surface of its central leaflet, the average number of leaves per plant and planting geometry. The relationship between the size of leaflets and petiole follow normal distribution functions, adjusted with field data. Data was collected in three sampling areas of 1 m<sup>2</sup>, in a plot of production, where leaves were measured four times to simulate different densities of vegetation. Simultaneously, photographs were taken from illumination angles at, 0°, 15° and 30°, to measure the void fraction near nadir, to estimate the light intercepted by the leaves around solar noon. The model was used to build virtual canopies equivalent to those measured in field. Linear correlations between the void fraction (from each illumination angle) of the actual canopy (photographs) and virtual (projections) were calculated; obtaining  $r > 0.98$  and  $RMSE < 0.023$ . The model satisfactorily represents

\* Recibido: julio de 2014  
Aceptado: noviembre de 2014

y virtuales (proyecciones), obteniendo  $r > 0.98$  y  $RMSE < 0.023$ . El modelo representa satisfactoriamente el dosel de plantas de fresa en lo que corresponde a la intercepción de luz y puede utilizarse para modelos de simulación del funcionamiento del cultivo.

**Palabras clave:** *Fragaria vesca* L., dosel virtual, modelado ecofisiológico, modelo computacional.

## Introducción

El modelado consiste en representar el funcionamiento de un sistema bajo la forma de un conjunto de leyes matemáticas que describen sus componentes más importantes, así como las interacciones entre ellos. En el caso de una planta, los componentes representados son los que intervienen en el desarrollo (leyes arquitecturales y fenología), el crecimiento (aumento y distribución de biomasa) y la producción (los frutos), así como los mecanismos a través de los cuales la planta interactúa con el medio ambiente (en particular, los efectos del clima, de la disponibilidad hídrica y de la nutrición mineral) (Thornley and Johnson, 2000).

El modelado de plantas comenzó en los años 1950, con de Wit (1958). En los años 1960-1970 se desarrollaron los primeros modelos suelo- planta- atmósfera (Hanks, 1974). En los años 1980 aparecieron los primeros modelos de cultivo, que a lo largo de los años han evolucionado siguiendo dos líneas diferentes (Fourcaud *et al.*, 2008; Vos *et al.*, 2009): la escuela estadounidense ha privilegiado el desarrollo de modelos de tipo empírico, más enfocados a previsiones de rendimiento que al estudio del funcionamiento de las plantas (por ejemplo los modelos CERES o EPIC (Ritchie y Otter, 1985; Stöckle *et al.*, 1994); mientras que la escuela europea, y en particular la holandesa (Marcelis *et al.*, 1998), se ha enfocado a la construcción y al estudio de modelos ecofisiológicos (derivados del modelo original SUCROS), con el objetivo de integrar los conocimientos de fisiología en modelos de funcionamiento de las plantas; el esqueleto de estos modelos es la producción de asimilados, a través de la fotosíntesis, y su distribución entre órganos (el balance N-C), sin considerar normalmente una representación explícita de la morfología de la planta. Más recientemente se han desarrollado modelos que describen de manera explícita el desarrollo tridimensional de la estructura de las plantas como resultado de los procesos fisiológicos, los cuales a su vez dependen de factores ambientales funcional-structural

the canopy of strawberry plants which corresponds to light interception and can be used to simulate performance models of a crop.

**Keywords:** *Fragaria vesca* L., computational model, ecophysiological modeling, virtual canopy.

## Introduction

Modeling is to represent the operation of a system in the form of a set of mathematical laws describing its major components and the interactions between them. In the case of a plant, the components shown are those involved in the development (architectural laws and phenology), growth (biomass increase and distribution) and production (fruit), thus the mechanisms through which plants interact with the environment (in particular, the effects of climate, water availability and mineral nutrition) (Thornley and Johnson, 2000).

Modeling of plants began in 1950, with de Wit (1958). In 1960-1970 the first plant-soil-atmosphere models (Hanks, 1974) were developed. In 1980 appeared the first crop models, which over the years have evolved along two different lines (Fourcaud *et al.*, 2008; Vos *et al.*, 2009): the American school has prioritized the development of empirical models, focused on yield forecasts than to the study of how plants work (models such as CERES and EPIC) (Ritchie and Otter, 1985; Stöckle *et al.*, 1994); while European school, and in particular the Dutch (Marcelis *et al.*, 1998), has focused on the construction and study of ecophysiological models (derived from the original model SUCROS), aiming to integrate the knowledge of physiology in models of plant operation; the skeleton of these models is the production of assimilates through photosynthesis, and its distribution among organs (N-C balance), not normally considered an explicit representation of plant morphology. More recently there have been developed models that explicitly describes the three-dimensional development of plant structure as a result of physiological processes, which in turn depend on functional-structural plant models (SFPM); (Vos *et al.*, 2010; DeJong *et al.*, 2011). Realistic representations of architecture allow a precise calculation of the radiation intercepted by the plant, which in turn is the engine of its growth and development and therefore constitutes a key data to model its operation.

plant models (SFPM); Vos *et al.*, 2010; DeJong *et al.*, 2011). Las representaciones realistas de la arquitectura permiten un cálculo preciso de la radiación interceptada por la planta, que a su vez es el motor de su crecimiento y desarrollo y por lo tanto constituye un dato fundamental para modelar su funcionamiento.

Los modelos de representación tridimensional de las plantas tienen su origen en el L-Systems (Lindermayer, 1975; Prusinkiewicz, 1990), que es un lenguaje formal para describir la estructura de cualquier planta a partir de la definición de una serie de elementos (hojas, nodos, ramas, brotes, flores, etc) y las relaciones entre ellos. Para la representación gráfica de la planta, a cada elemento se le asocia una forma geométrica simple. La representación puede ser estática o volverse dinámica a partir del establecimiento de reglas de aparición de nuevos elementos. Los modelos basados en L-systems se han utilizado para estudiar cultivos como el trigo y otros cereales, el tomate o la patata, así como numerosos árboles frutales (café, durazno, manzano, etc.) o forestales (Allen *et al.*, 2005).

En el caso de plantas con estructuras particularmente simples, como el maíz, se han propuesto modelos específicos no basados en L-Systems (España *et al.*, 1999). Representaciones tridimensionales de doseles vegetales se han utilizado, por ejemplo, para estudiar el movimiento de predadores, la dispersión del polen y de pesticidas, o la penetración de la lluvia. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en el efecto de la arquitectura de las plantas sobre la interceptación de la luz, con el fin de evaluar el impacto de las estrategias de plantación (densidad, orientación, distribución, etc.), cultivo (riego, poda, etc.) e iluminación (en campo o en invernadero) sobre el crecimiento de las plantas y la producción primaria neta (Vos *et al.*, 2010).

La interceptación de la luz para una determinada dirección de iluminación corresponde exactamente a la proyección del dosel en esa dirección (López-Lozano *et al.*, 2007) y equivale a la fracción de huecos,  $P_0$ . Ésta se define como la probabilidad de que un rayo de luz que atraviesa un dosel vegetal en una dirección dada, llegue al suelo sin interceptar ningún elemento de la vegetación; depende de la cantidad de área foliar y de su posición en el espacio (Weiss *et al.*, 2004). El nivel de detalle en la representación del dosel vegetal, en términos del número de polígonos (usualmente triángulos) con los que se aproxima la forma de las hojas, tallos, etc., tiene importantes repercusiones en los requerimientos de memoria y tiempo de cálculo de los modelos (Fournier and Pradal, 2012).

The representation of three-dimensional models of plants originate from the L-Systems (Lindermayer, 1975; Prusinkiewicz, 1990), which is a formal language to describe the structure of any plant from the definition of a number of elements (leaves, nodes, branches, buds, flowers, etc.) and the relationships between them. In the graphic representation of the plant, each element is associated to a simple geometric shape. The representation can be static or become dynamic from establishing rules of appearance of new elements. Models based on L-systems have been used to study crops like wheat and other cereals, tomato and potato, thus a numerous fruit trees (coffee, peach, apple, etc.) or forestry (Allen *et al.*, 2005).

In the case of plants with particularly simple structures, such as corn, specific models have been proposed not based on L-Systems (España *et al.*, 1999). Three-dimensional representations of plant canopies have been used, for example, to study the movement of predators, pollen dispersal and pesticides, or rain penetration. However, most studies have focused on the effect of plant architecture on light interception, in order to assess the impact of planting strategies (density, orientation, distribution, etc.), crop (irrigation, pruning, etc.) and illumination (field or greenhouse) on plant growth and net primary production (Vos *et al.*, 2010).

Light interception for a given illumination direction corresponds exactly to the projection of the canopy in that direction (López-Lozano *et al.*, 2007) and is equivalent to the void fraction,  $P_0$ . This is defined as the probability that a ray of light passing through a canopy in a given direction, reaches the ground without intercepting any element of the vegetation; depends on the amount of leaf area and its position in space (Weiss *et al.*, 2004). The level of detail in the representation of the canopy, in terms of the number of polygons (usually triangles) with the shape of the leaves, stems, etc. approaches, has important implications for memory requirements and computing time of the models (Fournier and Pradal, 2012).

The architectural simplicity of strawberry plant (no stem elongation, reduced leaf number and small size), makes it a good candidate for the development of computer models representing its spatial structure in relatively realistic way. This is a crop of major economic importance in Mexico, with a production of 360 426 t in 2012, worth over four billion pesos, especially in Michoacán, with 203 314 t (53% of the domestic production) (SAGARPA, 2013).

La simplicidad arquitectural de la planta de fresa (ausencia de alargamiento del tallo, número reducido de hojas y tamaño pequeño), la convierte en una buena candidata para el desarrollo de modelos informáticos que representen su estructura espacial de forma relativamente realista. Se trata de un cultivo de gran importancia económica en México, con una producción de 360 426 toneladas en 2012, con un valor superior a los cuatro mil millones de pesos mexicanos, y en particular en Michoacán, con 203 314 toneladas (53% de la producción nacional) (SAGARPA, 2013).

Esto confiere un gran interés al estudio del funcionamiento de la planta de fresa, en particular a través de modelos ecofisiológicos. Existen algunos trabajos sobre la arquitectura de la fresa, enfocados a la descripción del desarrollo de la planta y la aparición de frutos, para diferentes variedades (Savini y Neris, 2003; Bosc *et al.*, 2012) y condiciones de cultivo (Savini *et al.*, 2005); sin embargo los resultados se presentan en forma esquemática o paramétrica, pero sin realizar una representación tridimensional realista de la planta.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar un dosel de fresa en etapa productiva (tamaño, posición y orientación de las hojas) y obtener un modelo para representarlo en forma de dosel virtual tridimensional. El dosel virtual construido debe ser simple, pero al mismo tiempo capaz de simular correctamente la intercepción de la luz, en términos de la fracción de huecos, para poder ser utilizado posteriormente en trabajos de modelado ecofisiológico.

## Material y métodos

### Descripción del modelo de planta de fresa

Se diseñó el modelo informático de plantas y doseles virtuales de fresa en etapa productiva. En el modelo, las hojas están formadas por tres folíolos, uno central y dos laterales iguales, cada uno representado por un romboide compuesto por cuatro triángulos adyacentes (según el esquema de la Figura 1a). El eje principal de los folíolos laterales es horizontal y perpendicular al eje principal del folíolo central. La relación entre el área del folio central (S) y de los laterales (S') es constante y conocida. La forma de los folíolos viene dada por la longitud de sus dos ejes de simetría perpendiculares (a y b para el folíolo central, y a' y

This gives a great interest to the study of how strawberry plant work, particularly through eco physiological models. There is some work on the architecture of the strawberry, focused on the description of plant development and the appearance of fruits for different varieties (Savini and Neris, 2003; Bosc *et al.*, 2012) and crop conditions (Savini *et al.*, 2005); however the results are shown in a schematic or parametric form, but without making a realistic three-dimensional representation of the plant.

The aim of this study was to characterize a canopy of strawberry during the production stage (size, position and orientation of the leaves) and to obtain a model to represent it in the form of a three-dimensional canopy. The constructed canopy must be simple, but at the same time able to correctly simulate light interception, in terms of the void fraction, to be used later in ecophysiological modeling research.

## Materials and methods

### Model description of strawberry plant

The computer model of virtual plants and canopies of strawberry during production stage was designed. In the model, the leaves are formed of three leaflets, one central and two equal sides, each represented by a rhomboid comprised of four adjacent triangles (according to the scheme of Figure 1a). The main axis of the lateral leaflets is horizontal and perpendicular to the main axis of the central leaflet. The ratio between the area of the central leaflet (S) and lateral (S') is constant and known. The shape of the leaflets is determined by the length of two perpendicular axes of symmetry (a and b for the central leaflet, and a' and b' for lateral leaflets) and the position of the intersecting point (c and c'). The relationship between the axis of the central leaflet (b/a and c/b) is proportional to the same ratio in lateral leaflets (b'/a' and c'/b', respectively). Each of these parameters follows probability distributions that may be considered to be represented by normal laws. To build a leaf the model randomly chooses the values of the surface (S) and the relations between the axis of the central leaflet (b/a and c/b) within their normal distributions. Geometric and proportionality ratios existing between them, define their shape and size.

$b'$  para los folíolos laterales) y la posición del punto en que intersectan ( $c$  y  $c'$ ). La relación entre los ejes del folíolo central ( $b/a$  y  $c/b$ ) es proporcional a la misma relación en los folíolos laterales ( $b'/a'$  y  $c'/b'$ , respectivamente). Cada uno de estos parámetros sigue distribuciones probabilísticas que pueden considerarse representadas por leyes normales. Para construir una hoja el modelo escoge aleatoriamente los valores de la superficie ( $S$ ) y las relaciones entre los ejes del folíolo central ( $b/a$  y  $c/b$ ) dentro de sus distribuciones normales. Las relaciones geométricas y de proporcionalidad existentes entre ellos, definen su forma y tamaño.

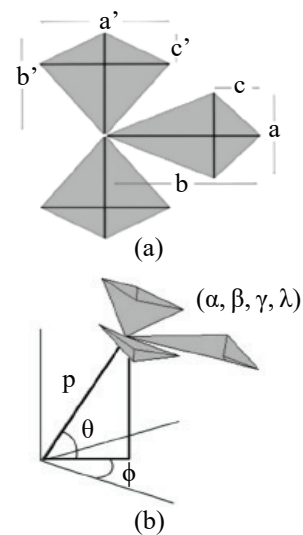
La hoja no es plana, sino que los segmentos que unen los triángulos que constituyen cada folíolo, forman un pequeño ángulo con el plano de la hoja ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) y éste a su vez con respecto a la horizontal ( $\lambda$ ). La posición de la hoja en la planta es determinada por la orientación de su pecíolo ( $\phi, \theta$ ) y su longitud ( $p$ ) que es proporcional a la anchura del folíolo central,  $a$  (Figura 1b). Cada uno de los ángulos que definen la posición y orientación de la hoja sigue una distribución probabilística representada por una ley normal.

En el modelo, una planta es un conjunto de hojas cuyos pecíolos tienen la misma posición de inicio en el plano horizontal. Del mismo modo, una parcela es un conjunto de plantas cuya ubicación en el plano viene dada por la geometría de plantación. Por tratarse de un cultivo en surcos, ésta corresponde a la distancia entre éstos y entre las plantas a su interior.

Así, las variables de entrada del modelo son: superficie del folio central, número de hojas por planta y distancia entre surcos y entre plantas consecutivas del mismo surco. La superficie foliar total de cada planta se conoce *a posteriori*, por lo que la comparación de las superficies foliares medida y simulada puede servir como validación del modelo.

### Obtención de datos de campo para la calibración del modelo

Los parámetros del modelo se calibraron a partir de medidas de campo. Para obtener la base de datos de calibración, se realizó una jornada de medidas de campo (25 de febrero de 2008) en un cultivo de fresa (variedad "Aromas") completamente desarrollado y en estado productivo, en una parcela de producción ubicada en El Valenciano, municipio de Ixtlán de los Hervores, en la región de Zamora, Michoacán, México (UTM 13Q 766136E 2230549N), donde se delimitaron aleatoriamente tres áreas de medida de  $1 \text{ m}^2$ . En cada área, las hojas de las plantas fueron arrancadas



**Figura 1. Esquema de los parámetros que describen la forma plana (a) y la orientación; y (b) de las hojas**  
**Figure 1. Schematic of the parameters that describe the plane shape (a) and orientation; and (b) the leaves.**

The leaf isn't plane but the segments joining triangles constituting each leaflet form a small angle with the plane of the leaf ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) and this in turn with respect to the horizontal ( $\lambda$ ). The position of the leaf on the plant is determined by the orientation of the petiole ( $\phi, \theta$ ) and the length ( $p$ ) which is proportional to the width of the central leaflet,  $a$  (Figure 1b). Each of the angles that define the position and orientation of the leaf follows a probability distribution represented by a normal law.

In the model, a plant is a set of leaves whose petioles have the same starting position in the horizontal plane. Similarly, a plot is a set of plants whose location in the plane is given by the geometry of planting. Being a row crop, this corresponds to the distance between them and between within the plants.

Thus, the input variables of the model are: surface of the central leaflet, number of leaves per plant, distance between rows and between consecutive plants of the same furrow. Total leaf area per plant is known *a posteriori*, so that the comparison of measured and simulated leaf surfaces may serve as validation of the model.

### Obtaining field data for model calibration

The model parameters were calibrated from field measurements. For the database of calibration, a field day of measurements was organized (February 25, 2008) in a strawberry crop (variety "Aromas") fully developed and in productive state, in a plot located in El Valenciano,

y fotografiadas sobre una superficie plana, lisa y blanca. Las fotografías fueron analizadas utilizando el programa ImageJ (disponible en línea: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>) para medir la superficie foliar individual, el número total de hojas y sus características geométricas. Con estos datos se obtuvieron las distribuciones de los parámetros ( $p/a$ ,  $c/b$ ,  $b/a$  y  $S$ ) y los valores de las constantes ( $(S'/S)$ ,  $(c'/b')/(c/b)$ ,  $(b'/a')/(b/a)$ ) del modelo.

Por la dificultad que representa la medición exacta de los ángulos de orientación de las hojas en campo, las distribuciones fueron ajustadas visualmente de manera aproximada.

### Construcción de un dosel virtual

Utilizando el modelo y las distribuciones de los parámetros establecidas a partir de los datos de campo, se construyó un dosel virtual para simular la parcela medida. Se utilizaron los valores (dentro del intervalo de la desviación estándar) de las variables de entrada medidas en campo: la misma superficie foliar del foliolo central, el mismo número promedio de hojas y la misma geometría de plantación de la parcela muestreada.

### Simulación de diferentes densidades de vegetación

Con el objetivo de simular parcelas con diferentes densidades y generar variaciones artificiales del número de hojas y de la densidad de vegetación, se arrancaron aleatoriamente un sexto de las hojas, en tres extracciones sucesivas, quedando la mitad de las hojas iniciales al final de la última extracción.

Para reproducir estas variaciones en el dosel virtual, se borraron de manera aleatoria, en tres tiempos, un número de hojas equivalente a las extraídas en campo. Como resultado se obtuvo un dosel virtual correspondiente a cada extracción.

### Validación del modelo: comparación de las fracciones de huecos

La habilidad del modelo para reproducir la estructura de un dosel real de fresa se evaluó comparando las fracciones de huecos de los doseles virtuales construidos con el modelo computacional, con las fracciones de huecos de las áreas de muestreo en campo, estimadas a partir del análisis de fotografías tomadas desde tres ángulos zenitales de observación alrededor del nadir (equivalen a los ángulos de iluminación, si se considera al sol en la posición del observador). Se obtuvo en cada caso: el coeficiente de correlación ( $r$ ), el error cuadrático medio (RMSE y RMSE relativo) y el sesgo (Bias y Bias relativo).

municipality of Ixtlan de los Hervores, in the region of Zamora, Michoacán, Mexico (UTM 13Q 766136E 2230549N), where three areas measuring  $1 \text{ m}^2$  were defined randomly. In each area, the leaves of the plants were pulled up and photographed on a flat, smooth and white surface. The photographs were analyzed using the ImageJ program (available online at: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>) to measure individual leaf area, total leaf number and its geometric features. With these data the distribution of the parameters ( $p/a$ ,  $c/b$ ,  $b/a$  y  $S$ ) and constant values ( $(S'/S)$ ,  $(c'/b')/(c/b)$ ,  $(b'/a')/(b/a)$ ) of the model, is obtained.

The difficulty that represents an accurate measurement of the angles orientation of leaves in the field, the distribution was adjusted visually approximately.

### Building a virtual canopy

Using the model and the parameters distributions established from field data, a virtual canopy was constructed to simulate the measured plot. The values (within the range of the standard deviation) of the input variables measured in the field were used; the same leaflet foliar surface, the same average number of leaves and the same geometry of planting from the sampled plot.

### Simulation of different vegetation densities

With the aim to simulate plots with different densities and generate artificial variations in the number of leaves and vegetation density, one-sixth of the leaves were pulled out randomly, in three successive extractions, leaving half of the original leaves at the end of the last extraction.

To reproduce these variations in the virtual canopy, were deleted at random, in three times, a number of leaves equivalent to the extracted ones from the field. As a result was obtained a virtual canopy corresponding to each extraction.

### Validation of the model: comparison of void fractions

The ability of the model to reproduce the structure of a real canopy of strawberry was evaluated by comparing the void fractions of virtual canopies constructed with the computational model, with the void fractions of the sampling areas in the field, estimated from the analysis of photographs taken from three zenith angles of observation around nadir (equal to the angles of illumination, if one considers the sun in the position of the observer). In each case was obtained: the correlation coefficient ( $r$ ), the mean square error (RMSE and relative RMSE) and bias (Bias and relative Bias).

Durante la experimentación en campo, se tomaron fotografías de las áreas de muestreo desde tres ángulos zenitales: 0°, 15° y 30°, una serie de fotografías después de cada extracción de hojas. En las fotografías se uniformizó el suelo y se eliminaron las plantas correspondientes a los surcos adyacentes (Corel Draw Graphics Suite X 3). Para la estimación de la fracción de huecos se recortó la parte de la fotografía correspondiente a la parte central del surco (de esta forma que el dosel se analizó como si fuera homogéneo, no en surcos), y se calculó la proporción de píxeles de suelo (Matlab (MathWorks, Inc.)). Para cada ángulo y cada densidad de vegetación, se calculó el promedio de la fracción de huecos de las tres áreas muestreadas.

Los doseles virtuales se proyectaron según las mismas geometrías de observación con las que se tomaron las fotos en campo, recortando la parte correspondiente al centro del surco. Así, se calculó la fracción de huecos como la proporción de píxeles de fondo.

## Resultados y discusión

### Calibración del modelo

En el Cuadro 1 se muestran las distribuciones (medias y desviaciones estándar) de los parámetros del modelo de arquitectura que describen la forma y tamaño de las partes de las hojas (foliolas y pecíolos); todos son normales ( $p < 0.05$ , prueba de Shapiro-Wilk). Asimismo, se presentan los valores de las constantes de proporcionalidad, calculadas como la media de medias.

Los parámetros del modelo han sido ajustados para una cierta variedad de fresa “Aromas” y en unas ciertas condiciones de cultivo, por lo que podría ser necesario reajustarlos para simular doseles en condiciones diferentes. En particular, la función de distribución del tamaño del foliolo central, valor a partir del cual se calcula la forma y tamaño de la hoja, así como la relación de proporcionalidad entre la longitud de la hoja y del pecíolo, podrían verse modificadas por las condiciones de fertilización o riego. Por otra parte, las relaciones entre los parámetros que definen la forma de la hoja podrían depender de la variedad de la planta; sin embargo, dado el nivel de simplificación de la representación, es probable que la afectación fuera baja.

During field experimentation, photographs of the sample areas were taken from three zenith angles: 0°, 15° and 30°, a series of photographs after the extraction of each leaf. In the photographs the ground was standardized and plants corresponding to adjacent rows were eliminated (Corel Draw Graphics Suite x 3). To estimate the void fraction of the portion of the photograph corresponding to the central part of the furrow was cut (so that the canopy is analyzed as if it was homogeneous, not in furrows), and the pixel ratio of the soil was calculated (Matlab (MathWorks, Inc.)) for each angle and each vegetation density, the average void fraction of the three sampled areas was calculated.

Virtual canopies were screened according to the same geometries of observation with which the photos were taken in the field, cutting the corresponding part of the central furrow. Thus, the void fraction as the ratio of background pixels was calculated.

## Results and discussion

### Calibration of the model

Table 1 shows the distributions (means and standard deviations) of the parameters from the architecture model describing the shape and size of the parts of the leaves (leaflets and petioles): all are normal ( $p < 0.05$ , Shapiro-Wilk test). Likewise, the values of proportionality constants, calculated as average mean are presented.

**Cuadro 1. Distribuciones de los parámetros del modelo que describen la forma y tamaño de las hojas (según Figura 1), obtenidas a partir de los datos de campo. Valores de las constantes de proporcionalidad entre diferentes elementos de las hojas.**

**Table 1. Distributions of model parameters that describe the shape and size of leaves (according to Figure 1), obtained from field data. Values of proportionality constants between different elements of the leaves.**

Parámetro	Media	Desviación estándar
p/a	2.885	0.725
c/b	0.736	0.029
b/a	1.341	0.169
S'/S	0.918	
(c'/b')/(c/b)	0.834	
(b'/a')/(b/a)	0.931	

En el Cuadro 2 aparecen los valores de los ángulos que describen la posición de las hojas en el espacio. La Figura 2 muestra como ejemplo una planta construida por el modelo.

**Cuadro 2. Parámetros del modelo que describen la posición de las hojas en el espacio (según esquema de la Figura 1b) ( $\Pi = \pi = 3.1415$ ).**

**Table 2. Model parameters describing the position of the leaves in space (according to the schematic from figure 1b) ( $\Pi = \pi = 3.1415$ ).**

Ángulo	Media (radianes)	Desviación estándar (radianes)
$\alpha$	$\Pi/24$	$\Pi/48$
$\beta$	$\Pi/16^\circ$	$\Pi/32$
$\gamma$	$\Pi/24$	$\Pi/18$
$\lambda$	$\Pi/18$	$\Pi/15$
$\theta$	$\Pi/2.769$	$\Pi/4$
$\phi$	$\Pi/4$	$\Pi/32$

### Construcción de un dosel virtual

Se utilizó el modelo informático para construir un dosel virtual, dando a las variables de entrada los valores medidos en campo, como aparecen en el Cuadro 3.

### Simulación de diferentes densidades de vegetación

El número de hojas retiradas, en promedio, en cada una de las tres áreas de muestreo fue: 44 en la primera extracción, 39 en la segunda y 44 en la tercera. Con el fin de reproducir estas sucesivas extracciones en el dosel virtual, se eliminó aleatoriamente el mismo número de hojas. Así se generaron, además del dosel original, tres doseles, uno para simular cada extracción. Las superficies foliares totales de los doseles reales (promedio de las tres áreas de muestreo), para el dosel inicial y después de cada extracción, se muestran en el Cuadro 4. En todos los casos las diferencias entre las superficies de los doseles reales y virtuales caen dentro del rango de valores de la desviación estándar del dosel real ( $0.215 \text{ m}^2$ ). Esta comparación *a posteriori* demuestra la capacidad del modelo para simular correctamente la densidad de vegetación del dosel.

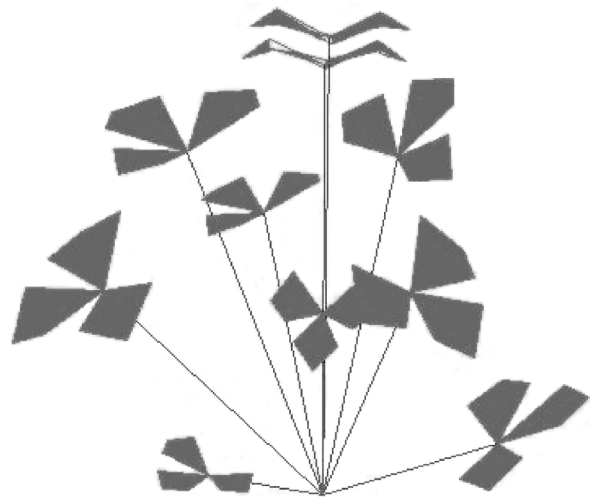
**Cuadro 3. Parámetros de entrada del modelo de construcción de plantas y doseles virtuales de fresa.**

**Table 3. Input parameters for the model plant construction and virtual canopies of strawberry.**

Variable	Media	Desviación estándar
Distancia entre surcos	0.268 m	0.03 m
Distancia entre plantas	0.227 m	0.02 m
Número total de hojas/planta	42	5
Superficie del foliolo central (S)	$0.001 \text{ m}^2$ ( $13.025 \text{ cm}^2$ )	$0.001 \text{ m}^2$ ( $5.031 \text{ cm}^2$ )

Model parameters have been fitted to a certain variety of strawberry "Aromas" and under certain crop conditions, so it may be necessary to readjust them to simulate canopies under different conditions. Particularly, the distribution function of the size of the central leaflet, value from which the shape and size of the leaf is calculated, thus the proportionality ratio between the length of the leaf and petiole, could be modified by the conditions of irrigation or fertilization. Moreover, the relations between the parameters that define the shape of the leaf may depend on plant variety; however, given the level of simplification of the representation, it is likely that the impact was low.

Table 2 shows the values of the angles describing the position of the leaves in space. Figure 2 shows as an example a plant built by the model.



**Figura 2. Ejemplo de una planta virtual construida por el modelo.**

**Figure 2. Example of a virtual plant built by the model.**

### Building a virtual canopy

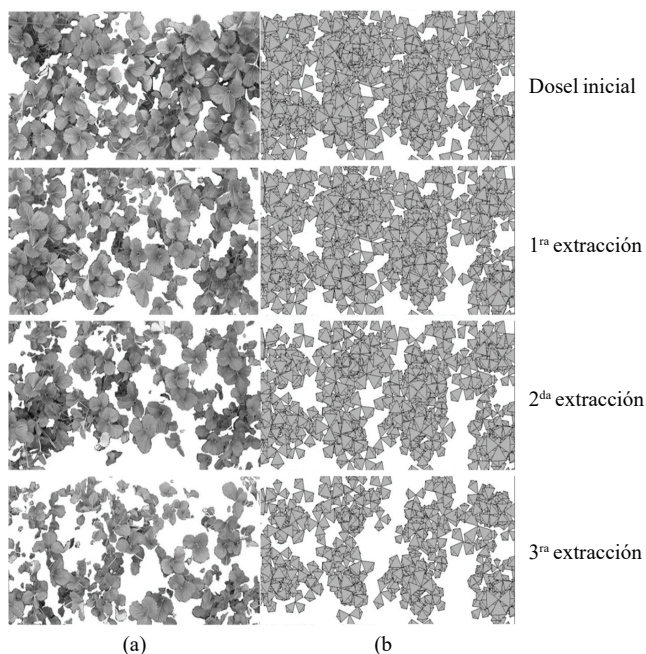
A computer model was used to build a virtual canopy, giving as input variables the values measured in the field, as shown in Table 3.



**Cuadro 4. Superficie foliar de los doseles reales (promedio de 3 áreas) y virtuales, inicialmente y después de cada extracción.**  
**Table 4. Leaf area of actual canopies (average of 3 areas) and virtual, initially and after each extraction.**

	Dosel real Promedio de las 3 áreas de muestreo (m <sup>2</sup> )	Dosel virtual (m <sup>2</sup> )	Diferencia entre el dosel real y virtual
Dosel completo	1.116	1.241	-0.125
Después de la 1 <sup>ra</sup> extracción	0.9	1.034	-0.134
Después de la 2 <sup>da</sup> extracción	0.724	0.849	-0.125
Después de la 3 <sup>ra</sup> extracción	0.527	0.642	-0.115

En la Figura 3 aparecen las fotografías desde el nadir de una de las áreas de muestreo, considerando las sucesivas extracciones de hojas, junto con los doseles virtuales correspondientes. Se observa que en general el dosel real es bien representado por el modelo; sin embargo, el dosel virtual muestra un aspecto más ordenado, con plantas más compactas y fáciles de distinguir. Esto es más notorio a medida que disminuye la densidad de hojas, después de las sucesivas extracciones, y se debe en gran medida a la perturbación generada con éstas.



**Figura 3. (a) Fotografías cenitales (0°) de una de las áreas de muestreo en campo, considerando las sucesivas extracciones de hojas; (b) proyecciones de los doseles virtuales desde el nadir.**

**Figure 3. (a) Zenith photographs (0°) of one of the sampling areas of the field, considering successive extractions of leaves; (b) projections of virtual canopies from nadir.**

### Simulation of different vegetation densities

The number of leaves removed, on average, in each of the three sample areas were: 44 in the first extraction, 39 in the second and 44 in the third. In order to reproduce these successive extractions in the virtual canopy, the same number of leaves was removed randomly; generating, besides the original canopy, three canopies, one to simulate each extraction. Total leaf surfaces of the actual canopy (average of the three sampling areas), for initial canopy and after each extraction, are shown in Table 4. In all cases the differences between surfaces of actual and virtual canopies fall within the range of values from the standard deviation of the actual canopy (0.215 m<sup>2</sup>). This comparison *a posteriori* demonstrates the ability of the model to correctly simulate vegetation density of the canopy.

Figure 3 shows photographs from the nadir of one of the sampling areas, considering the successive extractions of leaves, along with the corresponding virtual canopies. It is observed that overall the actual canopy is well represented by the model; however, the virtual canopy shows a neater appearance, with more compact and easily distinguishable plants. This is most noticeable as leaf density decreases, after successive extractions, and largely due to the disturbance generated by these.

### Validation from P<sub>0</sub>

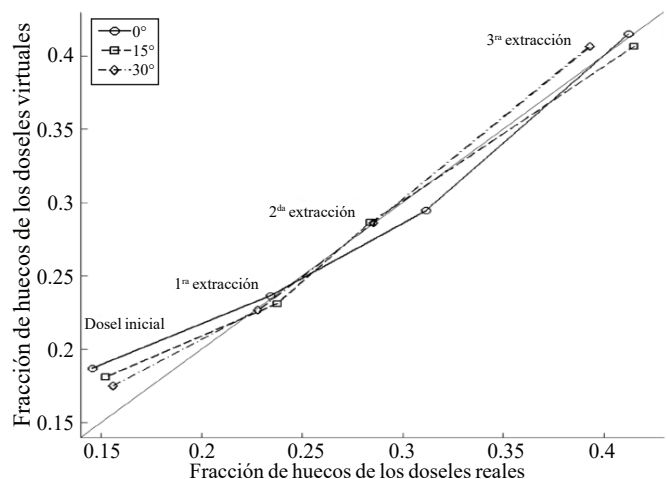
The correlation between void fractions of the actual canopies (average of the three measured areas, at beginning and in the three extractions) and four virtual canopies constructed with the model, for each observation angles considered (0°, 15° and 30°) was calculated. Figure 4 shows that as leaves density decreases, the void fraction increases, passing from 0.15 to 0.4. The largest error in the estimation of void fraction with virtual canopy is produced for the denser canopy when

## Validación a partir de $P_0$

Se calculó la correlación entre las fracciones de huecos de los doseles reales (el promedio de las tres áreas medidas, al inicio y en las tres extracciones) y de los cuatro doseles virtuales construidos con el modelo, para cada uno de los ángulos de observación considerados ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $30^\circ$ ). En la Figura 4 se observa que a medida que disminuye la densidad de hojas, aumenta la fracción de huecos, que pasa de 0.15 a 0.4. El mayor error en la estimación de la fracción de huecos con el dosel virtual, se produce para el dosel más denso, cuando es observado desde el nadir ( $0^\circ$ ). Se trata de la situación en que la fracción de huecos tiende a su valor mínimo y se tiene la mayor sensibilidad a la representación del dosel, en particular a la orientación azimutal de las hojas y al recubrimiento entre ellas (López-Lozano *et al.*, 2007). Para la misma densidad, el error disminuye al aumentar el ángulo de observación. Los mejores resultados se observan, para todos los ángulos, después de la primera extracción y, para  $15^\circ$  y  $30^\circ$  después de la segunda; esto puede explicarse por la disminución del recubrimiento entre las hojas. Después de la última extracción, las hojas ya habían sufrido diferentes manipulaciones y habían quedado desplazadas con respecto a su situación inicial, en particular en su posición cenital (inclinación del peciolo); esto puede explicar que haya un error a  $15^\circ$  y  $30^\circ$ , pero no a  $0^\circ$ , ya que la observación vertical es menos sensible a las variaciones cenitales. El modelo no ha sido probado para ángulos más grandes, que corresponderían a niveles más bajos de iluminación solar; sin embargo, se podría esperar un mejor funcionamiento en estos casos.

Los valores estadísticos asociados a la regresión entre la fracción de huecos ( $P_0$ ) de los doseles reales y virtuales se muestran en el Cuadro 5. En general, se obtiene una buena correlación ( $r > 0.98$ ), un error bajo ( $RMSE < 0.023$ ) y poco sesgo ( $Bias \leq 0.008$ ), lo que demuestra que el dosel virtual representa correctamente al dosel real, en términos de la intercepción de la luz en primer orden, alrededor del mediodía solar. Estos resultados confirman que la distribución angular propuesta para las hojas en el modelo virtual, si bien no fue medida en campo, puede considerarse realista. En el caso de otros cultivos, como el tomate (Sarlikioti *et al.*, 2011a y b) o el maíz (López-Lozano *et al.*, 2007), se ha estudiado el efecto de la representación de las hojas (dimensión, posición y orientación de folíolos y peciolos), sobre la estimación de la luz interceptada, encontrando que los ángulos de las hojas son una característica fenotípica importante de la arquitectura de una planta y por lo tanto deben ser incorporados de manera

viewed from nadir ( $0^\circ$ ). This is the situation in which the void fraction tends to its minimum value and has the highest sensitivity to the representation of the canopy, in particular to the azimuthal orientation of the leaves and the lining between them (López-Lozano *et al.*, 2007). For the same density, the error decreases by increasing the observation angle. The best results are observed for all angles, after the first extraction and for  $15^\circ$  and  $30^\circ$  after the second; this can be explained by the decrease of the lining between leaves. After the last extraction, the leaves had already undergone several manipulations and had been displaced with respect to the initial situation, in particular in its zenith position (inclination of the petiole); this may explain why there is an error at  $15^\circ$  and  $30^\circ$ , but not at  $0^\circ$ , since the vertical observation is less sensitive to zenith variations. The model has not been tested for larger angles, which would correspond to lower levels of solar illumination; however, it would be expected a better performance in these cases.



**Figura 4. Correlaciones entre los valores de la fracción de huecos de los doseles reales y virtuales para diferentes densidades de vegetación, considerando tres ángulos de observación.**

**Figure 4. Correlations between the values of void fraction from the real and virtual canopies for different vegetation densities, considering three angles of observation.**

The statistical values associated to the regression between the void fraction ( $P_0$ ) of actual and virtual canopies are shown in Table 5. In general, a good correlation ( $r > 0.98$ ), a low error ( $RMSE < 0.023$ ) and low bias ( $Bias \leq 0.008$ ) is obtained; demonstrating that the virtual canopy correctly represents the actual canopy, in terms of light interception in first order around solar noon. These results confirm that the angular distribution proposed for leaves in the virtual model, although if it was not measured in the field, can be considered

explícita en los modelos de estructura y funcionamiento de doseles. Dada la simplicidad de la estructura la planta de fresa, (todas las hojas parten de un único punto en el suelo), las hojas se distribuyen radialmente tendiendo a formar una semiesfera, con el fin de evitar los recubrimientos entre ellas y asegurar que cada una reciba el máximo de luz.

realistic. For other crops, such as tomatoes (Sarlikioti *et al.*, 2011a and b) or maize (López-Lozano *et al.*, 2007), has been studied the effect of leaves representation (size, position and orientation of leaflets and petioles) on the estimation of light interception, finding that the angle of the leaves are an important phenotypic characteristic of plant architecture

**Cuadro 5. Valores estadísticos obtenidos al comparar la fracción de huecos (P0) de los doseles reales (promedio de 3 áreas) y virtuales para cada ángulo de observación.**

**Table 5. Statistical values obtained by comparing the void fraction (P0) of real (average of 3 areas) and virtual canopies for each angle of observation.**

Ángulo de observación	$r (p < 0.05)$	RMSE	RMSE <sub>r</sub> (%)	Bias	Bias <sub>r</sub> (%)
0°	0.984	0.022	8.146	0.007	2.627
15°	0.994	0.015	5.66	0.004	1.488
30°	0.995	0.012	4.361	0.008	2.934

El modelo propuesto puede utilizarse para estimar la luz interceptada por las plantas e incluso la luz interceptada por cada una de las hojas separadamente. Así, puede servir como base para modelos de funcionamiento ecofisiológico del cultivo de fresa, como los propuestos por Savini y Neris (2003), Savini *et al.* (2005) y Bosch *et al.* (2012), permitiendo estimar de manera precisa de la intercepción luminosa, al considerar la representación realista de la planta.

## Conclusiones

Se presenta un modelo que permite la construcción de plantas y doseles de fresa virtuales en etapa productiva, basado en ecuaciones matemáticas y parámetros calibrados a partir de mediciones de campo. El modelo es muy simple (cada hoja es representada por 12 triángulos), lo que reduce los requerimientos de tiempo de cálculo y memoria, tanto para la construcción como para la utilización de los doseles virtuales. Las variables de entrada del modelo son fáciles de medir en campo, por lo que resulta sencillo obtenerlas para construir un dosel virtual que simule cualquier parcela real de fresa de la misma variedad y condiciones de cultivo. Con el modelo se construyó un dosel virtual para simular el dosel real utilizado en la calibración; se generaron artificialmente diferentes densidades de vegetación.

Se pudo constatar la buena correspondencia entre la superficie foliar total de los doseles reales y virtuales para todas las densidades. Por otra parte, se comprobó a partir de la comparación de la fracción de huecos, que los doseles

and therefore should be explicitly incorporated in models of structure and functioning of canopies. Given the simplicity of the structure of strawberry plant (all leaves start from a single point on the ground), the leaves are radially tending to form a hemisphere, in order to avoid overlapping between them and ensure that each receive maximum light.

The proposed model can be used to estimate the light intercepted by the plants and even the light intercepted by each of the leaves separately. Thus, it can serve as a basis for models of ecophysiological functioning of strawberry, as those proposed by Savini and Neris (2003), Savini *et al.* (2005) and Bosch *et al.* (2012), enabling to accurately estimate light interception, considering realistic representations of the plant.

## Conclusions

A model that enables the construction of plants and virtual canopies of strawberry at production stage, based on mathematical equations and parameters calibrated from field measurements is presented. The model is very simple (each leaf is represented by 12 triangles), which reduces the requirements for memory and computation time, both for construction, as for the use of virtual canopies. The input variables of the model are easily measured in the field, making it easy to obtain them to build a virtual canopy that simulates any real plot of strawberry of the same variety and growing conditions. With the model

virtuales simulan correctamente la intercepción de la luz en primer orden de los doseles reales, para posiciones de iluminación alrededor del nadir, que son los ángulos más sensibles a la representación de los elementos foliares. Esto implica que estos doseles virtuales se podrán utilizar para la estimación precisa de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel real, en modelos ecofisiológicos del funcionamiento del cultivo.

## Literatura citada

- Allen, M. T.; Prusinkiewicz, P. and DeJong, T. M. 2005. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model. *New Phytologist*, 166:869-880.
- Bosc, J. P.; Neri, D.; Massetani, F. and Bardet, A. 2012. Relationship between plant architecture and fruit production of the short-day strawberry cultivar Gariguette. *J. Berry Res.* 2(2):105-111.
- DeJong, T. M.; Da Silva, D.; Vos, J. and Escobar-Gutiérrez, A. J. 2011. Using functional - structural plant models to study, understand and integrate plant development and ecophysiology. *Ann. Bot.* 108:987-989.
- De Wit, C. D. and Ennik, G. C. 1958. Over concurrentie. *Jaarboek Inst. Biol. Scheik. Onderz. LandbGewass. Meded.* 50:59-73.
- España, M. L.; Baret, F.; Aries, F.; Chelle, M.; Andrieu, B. and Prévot, L. 1999. Modeling maize canopy 3D architecture: application to reflectance simulation. *Ecol. Modelling*, 122(1):25-43.
- Fourcaud, T.; Zhang, X.; Stokes, A.; Lambers, H. and Korner, C. 2008. Plant growth modeling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models. *Ann. Bot.* 101:1053-1063.
- Fournier, C. and Pradal, C. 2012. A plastic, dynamic and reducible 3D geometric model for simulating gramineous leaves. *In: IEEE Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA)*. 125-132 pp.
- Hanks, R. J. 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. *Agron. J.* 66(5):660-665.
- Lindenmayer, A. 1975. Developmental algorithms for multicellular organisms: a survey of L-systems. *J. Theoretical Biol.* 54(1):3-22.
- López-Lozano, R.; Baret, F.; Chelle, M.; Rochdi, N. and España, M. 2007. Sensitivity of gap fraction to maize architectural characteristics based on 4D model simulations. *Agr. For. Met.* 143:217-229.
- Marcelis, L. F. M.; Heuvelink, E. and Goudriaan, J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.* 74:83-111.
- Prusinkiewicz, A. L. P.; Lindenmayer, A.; Hanan, J. S.; Fracchia, F. D. and Fowler, D. 1990. The algorithmic beauty of plants. Ed. Springer, New York. <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop.pdf>. 240 p.
- Ritchie, J. T. and Otter, S. 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. *In: ARS Wheat Yield Project. ARS-38. Natl. Tech. Info. Serv. Springfield, Missouri* 159-175.
- was built a virtual canopy to simulate the actual canopy used in the calibration; generating artificially different vegetation densities.
- It was able to validate good correspondence between total leaf area of real and virtual canopies for all densities. Moreover, it was confirmed from the comparison of void fraction, that virtual canopies correctly simulate light interception in first order of real canopies, for illumination positions around nadir, which are the most sensitive angles to the representation of the leaf elements. This implies that these virtual canopies can be used for accurate estimation of the fraction of photosynthetically active radiation intercepted by the actual canopy in ecophysiological models in crop performance.

*End of the English version*



- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2013. Atlas Agroalimentario 2013. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). México, D. F., México. 64-65 pp.
- Sarlokioti, V.; de Visser, P. H. B. and Marcelis, L. F. M. 2011a. Exploring the spatial distribution of light interception and photosynthesis of canopies by means of a functional - structural plant model. *Ann. Bot.* 107:875-883.
- Sarlokioti, V.; de Visser, P. H. B.; Buck-Sorlin, G. H. and Marcelis, L. F. M. 2011b. How plant architecture affects light absorption and photosynthesis in tomato: towards an ideotype for plant architecture using a functional - structural plant model. *Ann. Bot.* 108:1065-1073.
- Savini, G. and Neri, D. 2003. Strawberry architectural model. *In: Euro Berry Symposium-COST-Action 836 Final Workshop* 649. 169-176 pp.
- Savini, G.; Neri, D.; Zucconi, F. and Sugiyama, N. 2005. Strawberry growth and flowering: an architectural model. *Int. J. Fruit Sci.* 5(1):29-50.
- Stöckle, C. O.; Martin, S. and Campell, G. S. 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46:335-359.
- Thornley, J. H. M. and Johnson, I. R. 2000. Plant and crop modelling. A mathematical approach to plant and crop physiology. The Blackburn Press. Caldwell, New Jersey, USA. 669 p.
- Vos, J.; Evers, J. B.; Buck-Sorlin, G. H.; Andrieu, B.; Chelle M. and de Visser P. H. B. 2010. Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. *J. Exp. Bot.* 61(8):2101-2115.
- Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G. J.; Jonckheere, I. and Coppin, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. Forest Meteorol.* 121(1):37-53.