

## MÔ PHỎNG CÂN BẰNG NƯỚC VÀ MUỐI CHO CÂY BẮP (*ZEA MAYS* L.) TRÊN ĐẤT NHIỄM MẶN TẠI HUYỆN THANH PHÚ - TỈNH BẾN TRE

Nguyễn Văn Quý<sup>1</sup>, Nguyễn Minh Cường<sup>1</sup>, Nguyễn Hồng Giang<sup>1</sup>, Trần Huỳnh Khanh<sup>1</sup> và Võ Thị Gương<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Khoa Nông nghiệp & Sinh học Ứng dụng, Trường Đại học Cần Thơ

### Thông tin chung:

Ngày nhận: 12/06/2014

Ngày chấp nhận: 30/12/2014

### Title:

Simulation of soil water and salt balance in rootzone of maize crop on salt affected soil in Thanh Phu District, Ben Tre Province

### Từ khóa:

Cân bằng nước, độ mặn, bắp, mô phỏng, STELLA

### Keywords:

Water balance, maize, salinity, simulation, STELLA

### ABSTRACT

The research was executed in Thanh Phu District, Ben Tre Province. The objectives of this research were to (1) use STELLA simulation programme to build a soil water and salt balance model in rootzone of maize crop and (2) predict the soil moisture and salinity level during cropping season. The well simulated model was found for the soil water storage in the root zone ( $R^2 = 0.95$ ), RMSE = 2.1 mm, NRMSE = 2.84% and EF = 0.88). The model mimicked well the mean salt concentration in the root zone rather than specific data at different times of the cropping season. Simulated results of soil salinity showed that soil ECe was fitted with the easured value which was higher than the optimal value (1.7 mS/cm) for the development of maize during the cropping season. Due to the high soil salinity, the total crop evapotranspiration (228.16 mm) was decreased compared to the maximum crop evapotranspiration (264.92 mm). The simulated results of water balance in irrigated condition showed that total water amount needed for maize crop was about 52.3 mm. This figure was matched with the real irrigarion water measurement. In the water-saving irrigation condition without rainfall, the simulated result showed that the total irrigation amount for maize crop was 154.7 mm and the mean irrigation frequency was 5 days.

### TÓM TẮT

Đề tài nghiên cứu được thực hiện tại huyện Thanh Phú, tỉnh Bến Tre. Mục tiêu của đề tài nhằm (1) Sử dụng chương trình STELLA để xây dựng mô hình cân bằng nước và muối vùng rễ cây bắp và (2) Dự báo diễn biến ẩm độ đất và độ mặn của đất. Mô hình mô phỏng tốt lượng nước trữ trong đất ( $R^2 = 0,95$ , RMSE = 2,1 mm, NRMSE = 2,84 % và EF = 0,88). Mô hình mô phỏng tốt giá trị trung bình nồng độ muối trong vùng rễ hơn là từng giá trị ở những thời điểm khác nhau. Kết quả mô phỏng ECe của đất phù hợp với ECe đo thực tế là cao hơn giá trị tối hảo (1,7 mS/cm) cho sự phát triển của cây bắp trong suốt vụ trồng. Do độ mặn đất cao nên tổng lượng nước bốc thoát hơi (228,16 mm) bị giảm so với bốc thoát hơi tối đa (264,92 mm). Kết quả mô phỏng cân bằng nước cho cây bắp có tưới thì tổng lượng nước tưới trong suốt vụ trồng cần thiết khoảng 52,3 mm, phù hợp với lượng nước tưới thực tế trong thí nghiệm. Tưới nước tiết kiệm trong điều kiện không có mưa cho thấy tổng lượng nước tưới trong suốt vụ trồng là 154,7 mm với tần suất tưới trung bình là 5 ngày tưới một lần.

## 1 GIỚI THIỆU

Nhu cầu nước của cây bắp cho sự sinh trưởng và phát triển khá cao, khoảng 500 đến 800 mm trên một vụ trồng (Brouwer and Heibloem, 1986; Critchley and Siegert, 2000; Allen *et al.*, 1998). Ngoài yếu tố nước và độ mặn, sự ảnh hưởng của biến đổi khí hậu cũng là một trong các yếu tố ảnh hưởng đến năng suất bắp (Allen *et al.*, 1998; Tekwal and Bwade, 2011). Độ mặn của đất ảnh hưởng đến năng suất bắp do giảm khả năng cung cấp nước của đất nên nhu cầu bốc thoát hơi nước của cây bắp cũng sẽ giảm vì vậy làm giảm năng suất bắp (Allen *et al.*, 1998).

Ở Đồng bằng sông Cửu Long, sự cân bằng nước đối với cây trồng cạn (như cây bắp) trên vùng đất nhiễm mặn chưa được nghiên cứu, đặc biệt là ứng dụng mô hình toán để mô phỏng và dự báo biến động của ẩm độ đất theo thời gian. Bên cạnh đó, sự tích lũy muối vùng rẫy của đất trong điều kiện nước tưới bị nhiễm mặn trong thời gian dài cũng cần được mô phỏng và dự báo. Thông qua sự mô phỏng, ẩm độ của đất cũng như sự tích tụ muối vùng rẫy (nếu có) sẽ được dự báo và phục vụ cho công tác tưới tiêu, quản lý đất, nước hiệu quả hơn. Các thí nghiệm đồng ruộng sẽ tốn nhiều thời gian và chi phí, do đó việc ứng dụng mô hình sẽ hỗ trợ tốt cho việc thực hiện các thí nghiệm đồng ruộng. Để có thể quan sát một cách trực quan hơn mối quan hệ giữa các biến mô hình, chương trình STELLA có thể được áp dụng (Richmond *et al.*, 2003). Chương trình STELLA đã được ứng dụng rất tốt trong việc mô phỏng sự vận chuyển các chất qua hệ thống đất - cây trồng, sự ô nhiễm hóa chất trên đất nông nghiệp và sự cân bằng nước trên phạm vi đầm lầy (Zhang and Mitsch, 2005; Ouyang, 2008; Ouyang *et al.*, 2010; García de Bullen *et al.*, 2011). Do đó đề tài nghiên cứu cần thiết được thực hiện nhằm: (1) Xây dựng mô hình động cân bằng nước vùng rẫy cây bắp có tưới; (2) Dự báo diễn biến ẩm độ đất và độ mặn của đất trong suốt vụ trồng.

## 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Thí nghiệm đồng ruộng được thực hiện tại xã An Thạnh, huyện Thạnh Phú, tỉnh Bến Tre (9°95'00"N; 106°31'48"E). Thời gian thực hiện thí nghiệm từ tháng 5 năm 2013 đến tháng 8 năm 2013. Thí nghiệm gồm 3 lô lặp lại, diện tích mỗi lô là 120 m<sup>2</sup>. Giống bắp trồng cho thí nghiệm là HN88 với lượng phân bón được sử dụng là 140N-70P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-60K<sub>2</sub>O.

Thông qua thí nghiệm đồng ruộng, các số liệu đất và cây trồng được thu thập nhằm phục vụ cho mục đích thẩm định mô hình. Song song với quá trình thực hiện thí nghiệm đồng ruộng, mô hình cân bằng nước trong đất được xây dựng bằng phần mềm STELLA 8.0. Sau đó, số liệu thu thập từ thí nghiệm đồng ruộng một phần được làm đầu vào cho vận hành mô hình và một phần được dùng cho thẩm định mô hình.

### 2.1 Phát triển mô hình

#### 2.1.1 Mô hình cân bằng nước trong đất

Theo Raes (1982), sự cân bằng nước trong vùng rẫy cây trồng bao gồm các thành phần được trình bày bởi biểu thức sau:

$$W_{r,t} = W_{r,t-\Delta t} + (P_t - RO_t) + I_t + CR_t - DP_t - ET_{c,t} \quad (1)$$

Trong đó:  $W_{r,t}$ : lượng nước trữ trong vùng rẫy ở thời điểm  $t$  (mm);  $W_{r,t-\Delta t}$ : lượng nước trữ vùng rẫy ở thời điểm  $t-1$ ;  $(P_t - RO_t)$ : lượng mưa hiệu quả, bằng tổng lượng mưa trừ đi lượng nước chảy tràn bề mặt (mm);  $I_t$ : lượng nước tưới ở thời điểm  $t$  (mm);  $CR_t$ : lượng nước mao dẫn từ mực thủy cấp cạn ở thời điểm  $t$  (mm);  $DP_t$ : lượng nước trực di khỏi vùng rẫy ở thời điểm  $t$  (mm);  $ET_t$ : lượng nước bốc thoát hơi cây trồng ở thời điểm  $t$  (mm);  $\Delta t$ : bước thời gian.

Tuy nhiên, lượng nước trữ trong vùng rẫy cũng có thể được diễn tả bởi lượng nước rút vùng rẫy (Raes, 2002; Raes *et al.*, 2012):

$$D_{r,t} = D_{r,t-\Delta t} - (P - RO)_t - I_t - CR_t + DP_t + ET_{c,t} \quad (2)$$

Trong đó:  $D_{r,t}$ : lượng nước rút vùng rẫy ở thời điểm  $t$  (mm);  $D_{r,t-\Delta t}$ : lượng nước vùng rẫy ở thời điểm  $t - \Delta t$ ;  $\Delta t$ : bước thời gian.

**Lượng nước chảy tràn (RO):** Lượng nước chảy tràn bề mặt được đánh giá dựa trên phương pháp số đường cong (CN) (USDA, 1964; Steenhuis *et al.*, 1995):

$$RO = \frac{[P-(0,2)S]^2}{P+S-(0,2)S} \quad (3)$$

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

Trong đó:  $P$ : lượng mưa (mm);  $(0,2)S$ : lượng nước có thể thấm vào đất trước khi chảy tràn xảy ra;  $S$ : lượng nước trữ tiềm năng (mm); và  $CN$ : số đường cong, thay đổi theo ẩm độ đất và hệ số thẩm bão hòa ( $K_{sat}$ ) (Raes *et al.*, 2012). Trong nghiên cứu này,  $CN$  có giá trị là 75 cho  $K_{sat}$  có giá trị từ 50-250 mm/ngày.

**Lượng mưa hiệu quả (P-RO):** lượng mưa hiệu quả là lượng nước còn lại sau khi trừ đi lượng nước chảy tràn bề mặt.

**Mao dẫn (CR):** Lượng nước mao dẫn từ mực thủy cấp cạn lên vùng rễ được ước lượng dựa vào biểu thức sau:

$$CR = \exp \left[ \frac{\ln(z)-b}{a} \right] \quad (5)$$

Trong đó: CR: Lượng nước mao dẫn (mm/ngày); z: độ sâu mực thủy cấp bên dưới vùng rễ (m); a, b: thông số đặc trưng cho loại đất, là hàm số theo tính thấm bão hòa  $K_{sat}$  và sa cấu đất (Raes *et al.*, 2012).

Các thông số a và b được xác định bởi các biểu thức sau:

$$a = -0,6366 + 8 (10^{-4}) K_{sat} \quad (6)$$

$$b = -1,9165 + 0,7063 \ln(K_{sat}) \quad (7)$$

Trong đó:  $K_{sat}$  là hệ số thấm bão hòa (mm/ngày)

**Trục di (D):** Lượng nước giữa điểm thủy dung và bão hòa trục di khỏi vùng rễ được mô phỏng theo hàm số trục di (Raes *et al.*, 2012):

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau(\theta_{SAT} - \theta_{FC}) \frac{e^{\theta_i - \theta_{FC}} - 1}{e^{\theta_{SAT} - \theta_{FC}} - 1} \quad (8)$$

Nếu  $\theta_i = \theta_{FC}$  thì  $\Delta\theta_i/\Delta t = 0$ ; nếu  $\theta_i = \theta_{SAT}$  thì  $\Delta\theta_i/\Delta t = \tau(\theta_{SAT} - \theta_{FC})$ .

Trong đó:  $\Delta\theta_i/\Delta t$  là lượng nước trong đất giảm theo độ sâu i trong suốt bước thời gian  $\Delta t$  ( $m^3/m^3/ngày$ );  $\tau$  là hệ số trục di (không có đơn vị);  $\theta_i$  là ẩm độ thực tế ( $m^3/m^3$ );  $\theta_{SAT}$  là ẩm độ ở điểm bão hòa;  $\theta_{FC}$  là ẩm độ ở điểm thủy dung; và  $\Delta t$  là bước thời gian (ngày).

Hệ số trụ di  $\tau$  có giá trị từ 0 đến 1 và được tính bởi biểu thức:

$$\tau = 0.0866 K_{sat}^{0,35} \quad (9)$$

**Bốc thoát hơi cây trồng (ET<sub>c</sub>):**

Bốc thoát hơi cây trồng ET<sub>c</sub> (mm) được tính theo biểu thức sau (Raes *et al.*, 2012):

$$ET_c = K_s \times K_c \times ET_o \quad (10)$$

Trong đó:  $K_s$ : hệ số đáp ứng với sự thiếu nước (-);  $K_c$ : hệ số bốc thoát hơi cây trồng (-); ET<sub>o</sub>: bốc thoát hơi tham chiếu (mm).

$K_s$  có giá trị từ 0 đến 1 và được tính theo các trường hợp sau:

$$K_s = \left[ 1 - \frac{b}{K_{y100}} (\text{Ece trung bình} - \text{Ece ngưỡng}) \right] \frac{(TAW - D_r)}{(TAW - RAW)} \quad (11)$$

Trong đó:  $\theta_{FC}$ : ẩm độ đất ở điểm thủy dung ( $cm^3/cm^3$ ); Zr: độ sâu mọc rễ hiệu quả (m);  $W_r$ : lượng nước trữ vùng rễ (mm);  $W_{r,FC}$ : lượng nước trữ ở điểm thủy dung (mm).

Đối với cây bắp, Ece ngưỡng là 1,7 mS/cm. Có nghĩa là, khi Ece của đất dưới giá trị này, năng suất của bắp sẽ không bị ảnh hưởng do độ mặn.

Trong khi đó, bốc thoát hơi tham chiếu ET<sub>o</sub> (mm) được tính từ biểu thức của FAO-Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (12)$$

Trong đó:  $R_n$ : Bức xạ mặt trời ở bề mặt cây trồng ( $MJ/m^2/ngày$ ); G: Mật độ dòng nhiệt trong đất ( $MJ/m^2/ngày$ ), T: Nhiệt độ trung bình ngày tại chiều cao 2 m ( $^{\circ}C$ );  $u_2$ : Tốc độ gió tại chiều cao 2 m (m/s);  $e_s$ : Áp suất hơi nước bão hòa (kPa);  $e_a$ : Áp suất hơi nước thực tế (kPa);  $\Delta$ : Độ dốc của đường cong áp suất hơi nước ( $kPa/^{\circ}C$ );  $\gamma$ : Hằng số ẩm ( $kPa/^{\circ}C$ ) và 900: Hệ số chuyển đổi.

**Lượng nước tưới (I):** Lượng nước tưới đưa vào mô hình là lượng nước tưới thực tế. Tuy nhiên, ở chế độ tưới tiết kiệm lượng nước sẽ được tưới để đưa ẩm độ đất về ẩm độ thủy dung một khi ẩm độ đất đạt ẩm độ ngưỡng. Ngoài ra, một lượng nước được tính toán thêm nhằm hạn chế sự tích lũy muối vùng rễ trong trường hợp nước tưới bị nhiễm mặn. Biểu thức cho lượng nước tưới được thiết lập như sau:

Khi  $Dr < RAW$ : lượng nước tưới = Lượng nước tưới thực tế

Khi  $Dr \geq RAW$ : Lượng nước tưới =  $(Dr + ET_c \text{ hiệu chỉnh} + DP)/(1-LR)$  (13)

$$LR = ECw/(5 * Ece - ECw) \quad (14)$$

Trong đó: Dr: lượng nước rút vùng rễ (mm); RAW: lượng nước thực sự hữu dụng (mm); ET<sub>c</sub> hiệu chỉnh: bốc thoát hơi cây trồng hiệu chỉnh (mm); và DP: lượng nước trục di (mm); LR là hệ số rửa mặn; ECw: độ mặn nước tưới (mS/cm); Ece: độ mặn đất trích bão hòa (mS/cm).

**2.1.2 Mô hình tích lũy muối**

Lượng muối tích lũy trong vùng rễ cây trồng xuất phát từ lượng muối có trong đất cộng với

một lượng muối từ nước tưới và mao dẫn từ thủy cấp trừ đi lượng muối mất đi do trực di khỏi vùng rễ ở mỗi bước thời gian  $\Delta t$  (Raes *et al.*, 2012). Như vậy, mô hình cân bằng muối trong vùng rễ gắn liền với mô hình cân bằng nước. Các thành phần của mô hình cân bằng muối vùng rễ được tính toán như sau:

$$\text{SalC}_t = \text{SalC}_{t-1} + \text{SalC\_I}_t + \text{SalC\_CR}_t - \text{SalC\_DP}_t \quad (15)$$

Trong đó:  $\text{SalC}_t$ : hàm lượng muối ở thời điểm  $t$ ;  $\text{SalC}_{t-1}$ : hàm lượng muối ở thời điểm  $t-\Delta t$ ;  $\text{SalC\_I}_t$ : lượng muối do tưới ở thời điểm  $t$ ;  $\text{SalC\_CR}_t$ : lượng muối do mao dẫn ở thời điểm  $t$ ; và  $\text{SalC\_DP}_t$ : lượng muối mất do trực di ở thời điểm  $t$ . Đơn vị của các thành phần cân bằng muối nên được biểu diễn bằng  $\text{g/m}^2$  (Allen *et al.*, 1998; Raes *et al.*, 2012).

Các biểu thức cho sự chuyển đổi đơn vị trong mô hình cân bằng muối vùng rễ bao gồm:

$$\text{Lượng muối (g/m}^2\text{)} = \text{lượng nước (tưới, mao dẫn) (mm)} \times \text{EC (mS/cm)} \times 0,64 \quad (16)$$

$$\text{Nồng độ muối (g/l)} = \text{lượng muối (g/m}^2\text{)} / \text{lượng nước vùng rễ (mm)} \quad (17)$$

$$\text{Độ mặn (ECe, mS/cm)} = [\text{Nồng độ muối (g/l)} / 0,64] \times \text{hệ số chuyển đổi} \quad (18)$$

Trong đó: 0,64 là hệ số để chuyển đổi độ dẫn điện của dung dịch đất về nồng độ muối (g/l); 1 mm nước tương đương với 1  $\text{l/m}^2$  (Raes, *et al.*, 2012). Hệ số chuyển đổi giữa ECe và EC(1:2,5) được trích dẫn theo Ngô Ngọc Hưng (2009).

### 2.1.3 Mô tả chương trình STELLA

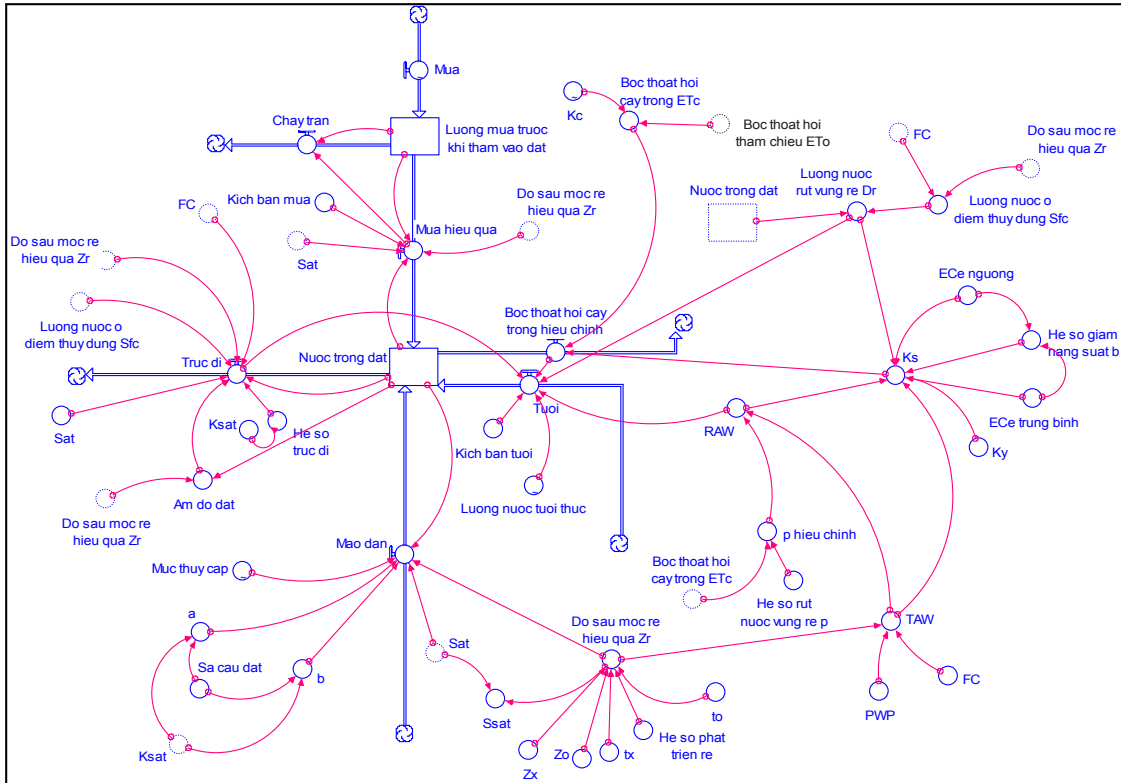
STELLA (Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation) là một chương trình máy tính cho phép xây dựng các mô hình mô phỏng hệ thống động (Ruth và Hannon, 2001). STELLA là một công cụ mô hình hóa mạnh

vi khả năng xây dựng mô hình hướng đối tượng của nó (Blankenship và Tumlinson, 1995; Ruth và Hannon, 2001). Giao diện trong STELLA là rất trực quan. STELLA sử dụng các biểu tượng để xây dựng các mô hình hệ thống động (Ruth và Hannon, 2001; Ouyang *et al.*, 2009). STELLA bao gồm 4 biểu tượng chính. Biểu tượng thứ nhất là Reservoir đại diện cho biến trạng thái, là biến dùng cho sự tích lũy vật liệu theo thời gian. Biểu tượng thứ hai là Flow đại diện cho biến tốc độ, là biến dùng cho sự vận chuyển và kiểm soát vật liệu giữa các biến trạng thái. Tiếp theo là Converter đại diện cho biến trợ, là biến có thể mang giá trị cố định hoặc thay đổi theo thời gian. Cuối cùng là Connector, là công cụ để kết nối các thành phần hệ thống với nhau. Connector mang thông tin (giá trị) từ một biến này đến một biến khác của hệ thống (Ruth và Hannon, 2001; Ouyang *et al.*, 2009). STELLA cho phép xây dựng một liên kết động để truy nhập hoặc xuất dữ liệu sang chương trình Excel (Ruth và Hannon, 2001) hoặc xuất mô hình STELLA sang chương trình mã nguồn mở R (Naimi và Voinov, 2012) cho các mục đích sử dụng khác nhau.

### 2.1.4 Cấu trúc mô hình cân bằng nước trong STELLA

Bước đầu tiên trong quá trình xây dựng mô hình cân bằng nước trong STELLA là xác định các thành phần của mô hình cân bằng nước và muối trong vùng rễ cây trồng. Bước tiếp theo là xác định loại biến (thành phần hệ thống) và mối quan hệ giữa các biến trong hệ thống. Bước tiếp theo là chuyển các thành mô hình và mối quan hệ giữa các thành phần vào STELLA. Cấu trúc mô hình cân bằng nước trong STELLA được trình bày trong Hình 1.

Mô hình tính  $\text{ET}_0$  trong STELLA và hệ số cây trồng Kc không được trình bày trong bài báo này.

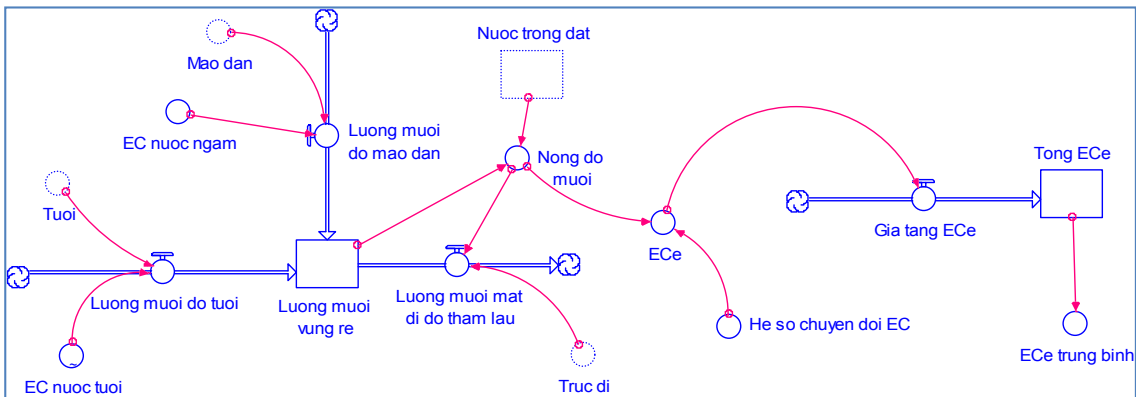


**Hình 1: Cấu trúc mô hình cân bằng nước trong STELLA**

TAW: tổng lượng nước hữu dụng (mm); RAW: lượng nước thực sự hữu dụng (mm); Sat: ẩm độ bão hòa ( $cm^3/cm^3$ ); FC: ẩm độ thủy dụng ( $cm^3/cm^3$ ); PWP: ẩm độ điểm héo ( $cm^3/cm^3$ ); Ece: độ dẫn điện dung dịch đất trích bão hòa (mS/cm); Zx: độ sâu mọc rễ hiệu quả lớn nhất (m); Zo: độ sâu mọc rễ hiệu quả ban đầu (mm); to: thời gian ban đầu (ngày); tmax: thời gian đạt độ sâu mọc rễ hiệu quả tối đa (ngày); a và b: các thông số đặc trưng cho sa cấu đất. Đơn vị của các thành phần mưa, trục di, mao dẫn, bốc thoát hơi và tưới được thể hiện bằng mm nước

**2.1.5 Cấu trúc mô hình cân bằng muối trong STELLA**

Mô hình cân bằng muối trong vùng rễ được trình bày trong Hình 2.



**Hình 2: Cấu trúc mô hình cân bằng muối trong STELLA**

Các biểu tượng với nét không liên tục (Nước trong đất, Mao dẫn, Tươi, Trục di) thể hiện các thành phần thuộc mô hình cân bằng nước

**2.2 Thăm định mô hình**

Thăm định mô hình là một tiến trình hiệu chỉnh các thông số mô hình cho đến khi kết quả đầu ra của mô hình gần với số liệu quan sát tương ứng. Đây là bước so sánh các giá trị thực đo với giá trị mô phỏng. Nếu các giá trị so sánh đạt yêu cầu thì

dùng và có thể áp dụng cho tính toán, nếu không đạt thì quay trở lại bước hiệu chỉnh. Việc đánh giá kết quả thăm định mô hình được thực hiện thông qua các thông số thống kê. Các thông số thống kê được dùng cho đánh giá kết quả thăm định mô hình được trình bày trong Bảng 1.

**Bảng 1: Các thông số thống kê được dùng cho đánh giá kết quả thăm định mô hình.  $O_i$  là giá trị thực đo;  $\bar{O}$  là giá trị thực đo trung bình;  $P_i$  là giá trị mô phỏng;  $\bar{P}$  là giá trị mô phỏng trung bình**

Thông số	Ký hiệu	Công thức	Khoảng giá trị	Giá trị tối ưu
Hệ số xác định	$R^2$	$\left[ \frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$	0 đến 1	Gần 1 (Moriassi <i>et al.</i> , 2007)
Căn bậc hai sai số bình phương trung bình	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}}$	0 đến $+\infty$	Gần 0 (Jacovides và Kontoyiannis, 1995)
Căn bậc hai sai số bình phương trung bình chuẩn hóa	NRMSE	$\frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \cdot 100$	0 đến 100%	Xuất sắc: < 10%: Tốt: 10% đến 20% Khá: 20 đến 30%: Kém: > 30%: (Raes <i>et al.</i> , 2012)
Hệ số mô hình	EF	$1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2}$	$-\infty$ đến 1	EF gần 1: sự phù hợp hoàn hảo giữa các giá trị mô phỏng và thực tế EF = 0: mô hình dự báo tốt giá trị trung bình của dữ liệu quan sát hơn là từng dữ liệu quan sát riêng biệt. (Moriassi <i>et al.</i> , 2007)

**2.3 Thu thập số liệu cho vận hành và thăm định mô hình**

*a. Số liệu đất*

Mẫu đất đầu vụ được thu ở độ sâu 0 – 20 cm. Các chỉ tiêu vật lý và hóa học đất đầu vụ được trình

bày trong Bảng 2.

Trong suốt vụ trồng, mẫu đất được thu theo định kỳ 02 tuần một lần và vào lúc thu hoạch để xác định ẩm độ đất và đo độ mặn (Bảng 2.4) nhằm phục vụ cho công tác thăm định mô hình.

**Bảng 2: Đặc tính đất đầu vụ tại Thạnh Phú, Bến Tre. Tháng 05 năm 2013. ESP: phần trăm Natri trao đổi; SAR: tỷ số hấp phụ Natri**

Độ sâu (cm)	Sa cấu			Dung trọng (g/cm <sup>3</sup> )	Ẩm độ thể tích (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Ẩm độ bão hòa (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	
	%cát	%thịt	%sét				
0-20	0,71	50,29	49,0	1,29	0,41	0,497	
Độ sâu (cm)	Ẩm độ thủy dung (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Ẩm độ điểm héo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Tính thấm bão hòa (mm/ngày)	pH(1:2,5)	EC (1:2,5) (mS/cm)	EC <sub>c</sub> (mS/cm)	
0-20		0,373	0,276	200	5,07	1,44	3,39
Độ sâu (cm)	Cation trao đổi (meq/100g)				ESP (%)	SAR (meq/100g) <sup>0,5</sup>	
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	M <sup>2+</sup>			
0-20	4,272	1,694	2,258	11,884	21,2	1,14	

b. Số liệu cây trồng

Các thông số cây trồng dùng làm đầu vào cho mô hình được thu thập từ thí nghiệm và một số

thông số được sử dụng từ các tài liệu có liên quan. Giá trị các thông số cây trồng được trình bày trong Bảng 3.

**Bảng 3: Các thông số cây bắp được thu thập tại thí nghiệm ở Thạnh Phú, Bến Tre, năm 2013**

Đặc tính cây trồng	Giá trị	Mô tả
Giai đoạn ban đầu (ngày)	20	Giai đoạn từ lúc trồng đến lúc tán lá bao phủ khoảng 10% mặt đất (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Giai đoạn phát triển (ngày)	20	Giai đoạn từ lúc độ che phủ tán lá đạt khoảng 10% đến lúc đạt độ che phủ tối đa (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Giai đoạn giữa vụ (ngày)	26	Giai đoạn từ lúc tán lá đạt độ che phủ tối đa đến lúc chín (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Giai đoạn cuối vụ (ngày)	8	Giai đoạn từ lúc chín đến lúc thu hoạch (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Độ sâu mọc rễ hiệu quả ban đầu, $Z_0$ (m)	0,1	Độ sâu lúc trồng; độ sâu ở đó hạt nảy mầm hoặc cây con có thể lấy nước (Raes <i>et al.</i> , 2012)
Độ sâu rễ hiệu quả lớn nhất, $Z_{max}$ (m)	0,28	Thông thường bằng 1/2 độ sâu mọc rễ tối đa, chiếm khoảng 70% vùng rễ (Evans <i>et al.</i> , 1996)
Ngày đạt độ sâu mọc rễ hiệu quả tối đa (ngày)	55	Ngày của vụ trồng mà kể từ đó độ sâu mọc rễ hiệu quả không gia tăng nữa.
Chiều cao tối đa (cm)	1,83	Chiều cao tối đa của cây bắp được xác định từ lúc cây bắp bắt đầu trổ cờ.
Hệ số đáp ứng năng suất ( $K_y$ )	1,25*	Phản ánh ảnh hưởng của sự giảm bốc thoát hơi lên sự giảm năng suất (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Hệ số rút nước vùng rễ ( $p$ )	0,5*	Phản ánh phần của tổng lượng nước hữu dụng (TAW) mà cây có thể lấy trước khi sự thiếu nước xảy ra (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Hệ số đường cong phát triển vùng rễ	1,3*	Phản ánh mức độ phát triển của vùng rễ (Raes <i>et al.</i> , 2012)
Hệ số chuyển đổi EC sang $E_{Ce}$	2.35	(Ngô Ngọc Hưng, 2009)

Ghi chú: \*Giá trị tham khảo

Số liệu khí tượng hằng ngày được dùng làm đầu vào cho mô hình cân bằng nước và năng suất bắp tiềm năng. Số liệu khí tượng được thu thập tại Trạm khí tượng thị trấn Ba Tri (cách nơi thực hiện thí nghiệm 10 km về hướng Bắc). Trừ lượng mưa

hằng ngày được đo đạc tại điểm thí nghiệm thông qua dụng cụ đo mưa (rain gauge) (Brouwer *et al.*, 1989). Bảng 4 trình bày số liệu khí tượng trung bình tháng.

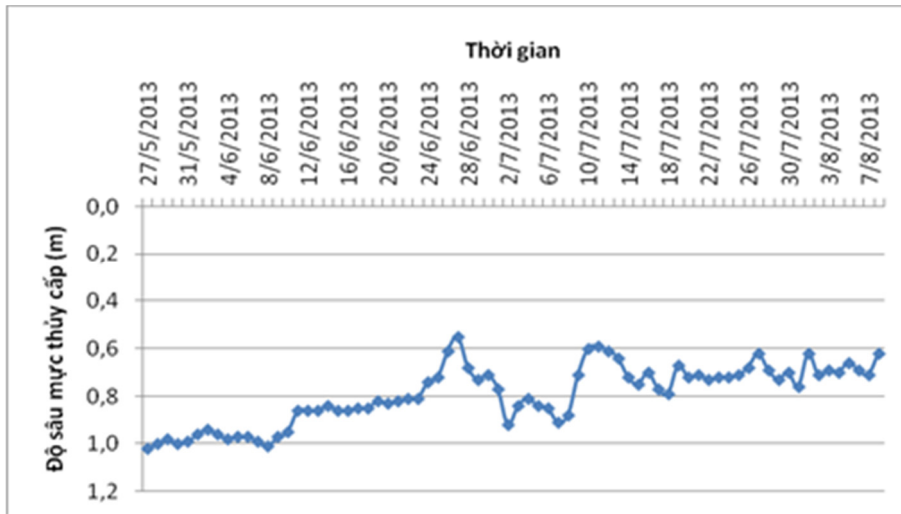
**Bảng 4: Số liệu khí tượng trung bình tháng thu thập tại Trạm Khí Tượng thị trấn Ba Tri, tháng 1 đến tháng 8 năm 2013 (Tmax: nhiệt độ cao nhất; Tmin: nhiệt độ thấp nhất; H: ẩm độ không khí tương đối; u: vận tốc gió; n: số giờ nắng và P: lượng mưa)**

Tháng	Tmax (°C)	Tmin (°C)	H (%)	u (m/s)	n (giờ)	P (mm)
1	29,4	23,7	80,1	1,7	6,5	2,5
2	30,3	24,3	77,7	2,4	8,2	1,6
3	31,6	24,9	80,1	1,5	9,7	0,0
4	32,7	26,2	80,3	1,6	7,1	23,3
5	33,8	26,2	82,7	1,1	6,8	56,9
6	32,3	25,5	85,0	1,4	5,0	61,6
7	31,8	25,0	83,9	1,7	5,1	57,6
8	31,5	24,7	86,4	1,5	3,0	139,1

c. Số liệu mực thủy cấp

Độ sâu mực thủy cấp (Hình 3) được đo đặc hằng ngày để làm đầu vào cho mô phỏng lượng nước mao dẫn từ mực thủy cấp. Tại thí nghiệm, một ống nhựa PVC đường kính 76 mm được đặt ở

độ sâu 1,5 m. Xung quanh phần thân ống được khoan lỗ để nước ngầm thấm vào. Khoảng cách từ mặt nước trong ống đến đầu trên của ống được ghi nhận, sau đó tính toán lại để có được độ sâu mực thủy cấp so với mặt ruộng.



Hình 3: Độ sâu mực thủy cấp hằng ngày được đo tại điểm thí nghiệm

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Đặc tính hóa-lý đất

Kết quả phân tích đất đầu vụ cho thấy đất tại điểm nghiên cứu có thành phần sét khá cao (49%) (Bảng 2.3). Mặc dù vậy, lượng nước hữu dụng của đất tương đối thấp (dưới 10%). Kết quả phân tích

hóa học đất cho thấy đất tại điểm nghiên cứu thuộc loại đất mặn (SAR < 13, E<sub>Ce</sub> < 4 mS/cm) (Bảng 2.3). Kết quả đo độ mặn ở các thời điểm khác nhau cho thấy độ mặn đất có xu hướng giảm theo thời gian và hầu hết đều cao hơn giá trị ngưỡng (1,7 mS/cm) cho sự giảm năng suất bắp (Bảng 5).

Bảng 5: Ẩm độ và độ mặn của đất (0-20cm) tại điểm thí nghiệm. Tháng 5/2013 đến tháng 8/2013

Thời gian	26/05	29/5	13/6	19/6	2/7	13/7	24/7	8/8	
Ngày sau khi trồng	Lúc xuống giống	3	18	24	37	48	59	74	
Độ ẩm (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		0,41	0,32	0,395	0,420	0,349	0,367	0,357	0,375
E <sub>Ce</sub> (mS/cm)		3,39	-	3,29	3,38	3,33	2,87	3,24	3,15

3.2 Hệ số cây trồng K<sub>c</sub> và bốc thoát hơi tham chiếu ET<sub>o</sub>

Kết quả tính toán hệ số cây trồng K<sub>c</sub> được trình bày trong Bảng 6.

Bốc thoát hơi tham chiếu (ET<sub>o</sub>) hằng ngày mô

phỏng được trình bày trong Hình 4.

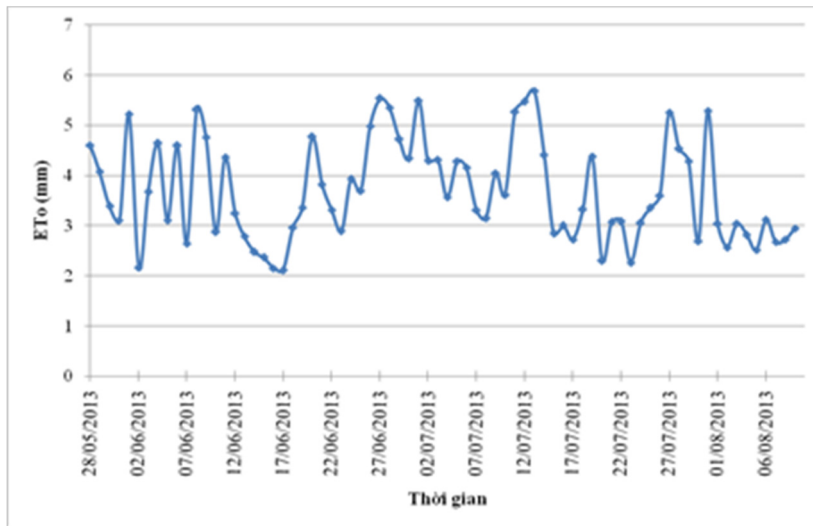
Kết quả mô phỏng cho thấy bốc thoát hơi tham chiếu hằng ngày dao động từ 2,1 đến 5,7 mm. Tổng lượng nước bốc thoát hơi tham chiếu trong suốt vụ trồng là 272,62 mm.

Bảng 6: Hệ số cây trồng (K<sub>c</sub>) cho cây bắp tại điểm nghiên cứu và giá trị tham khảo

Giai đoạn cây trồng	Điểm nghiên cứu		Phillipines (Allen et al., 1980)	
	Số ngày	K <sub>c</sub>	Số ngày	K <sub>c</sub>
Giai đoạn ban đầu	20	K <sub>Cini</sub> = 0,9	20	K <sub>Cini</sub> = 0,7
Giai đoạn phát triển	20	K <sub>Cmid</sub> = 1,05	20	K <sub>Cmid</sub> = 1,15
Giai đoạn giữa vụ	26		30	
Giai đoạn cuối vụ	8	K <sub>Cend</sub> = 0,9	10	K <sub>Cend</sub> = 1,05
Tổng cộng	74		80	

Ghi chú: Giá trị K<sub>c</sub> từ giai đoạn ban đầu (K<sub>Cini</sub>) đến giai đoạn phát triển (K<sub>Cmid</sub>) và từ giai đoạn phát triển đến giai đoạn cuối vụ (K<sub>Cend</sub>) được nội suy theo phương pháp của Allen et al. (1998)





Hình 4: Bốc thoát hơi tham chiếu mô phỏng

3.3 Kết quả thẩm định mô hình

Một số thông số mô hình được hiệu chỉnh để đạt được kết quả mô phỏng gần với số liệu thực tế ở một mức độ có thể chấp nhận thông qua đánh giá các chỉ số thống kê. Bảng 7 trình bày các thông số mô hình đã hiệu chỉnh.

Bảng 7: Các thông số mô hình đã hiệu chỉnh

Thông số	Giá trị
Hệ số đường cong phát triển vùng rễ	3,25
Hệ số thấm bão hòa - Ksat (mm/ngày)	200
Hệ số rút nước vùng rễ - p (-)	0,5
Độ sâu mọc rễ hiệu quả ban đầu - Zo (m)	0,1
Độ sâu mọc rễ hiệu quả lớn nhất Zmax (m)	0,28
Hệ số chuyển đổi EC sang ECe	2,96

3.3.1 Lượng nước trữ trong đất

Kết quả mô phỏng lượng nước trữ trong đất ở độ sâu 20 cm được so sánh với số liệu quan sát thực tế được trình bày trong Bảng 8. Trong khi đó, ẩm độ đất mô phỏng ở độ sâu 0-20 cm được so sánh với ẩm độ đất thực tế cùng độ sâu được trình bày trong Hình 8.

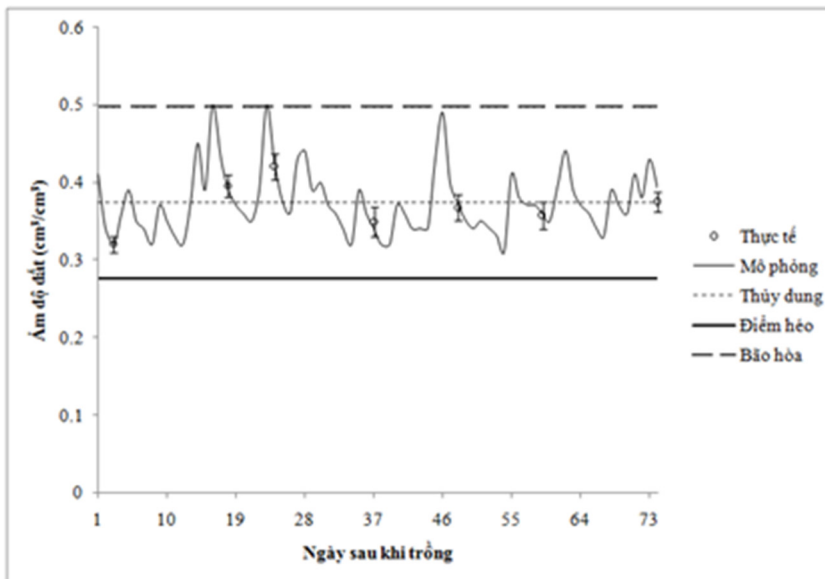
Bảng 8: Lượng nước trữ trong đất ở độ sâu 0-20 cm mô phỏng, thực tế và các chỉ số thống kê đánh giá kết quả mô phỏng.

Ngày sau khi trồng	Lượng nước trữ (mm)	
	Mô phỏng	Thực tế
3	64,0	60,8
18	79,0	77,2
24	84,0	86,0
37	69,8	68,1
48	73,4	73,1
59	71,5	71,3
74	75,0	78,2
Trung bình	73,8	73,5
R <sup>2</sup>		0,95
RMSE (mm)		2,10
NRMSE (%)		2,84
EF		0,88

Kết quả đánh giá mô hình (Bảng 8) cho thấy lượng nước trữ mô phỏng (0-20 cm) tương thích cao với kết lượng nước đo đạc thực tế thể hiện qua hệ số xác định cao R<sup>2</sup> = 0,95. Giá trị sai số bình phương trung bình sai rất thấp (RMSE = 2,10 mm) và một sai số bình phương trung bình chuẩn hóa

thấp (NRMSE = 2,84%) cho thấy mô hình mô phỏng rất tốt lượng nước trữ trong đất. Ngoài ra, hệ số hiệu quả mô hình EF khá gần 1 (0,88) càng cho thấy rằng mô hình mô phỏng rất có hiệu quả khi so sánh với số liệu đo đạc thực tế.

Kết quả mô phỏng diễn biến ẩm độ đất ở độ sâu 20 cm lớp đất mặt (Hình 5) cho thấy xu hướng biến động ẩm độ đất theo thời gian và rất gần với ẩm độ thực tế ở cùng độ sâu.

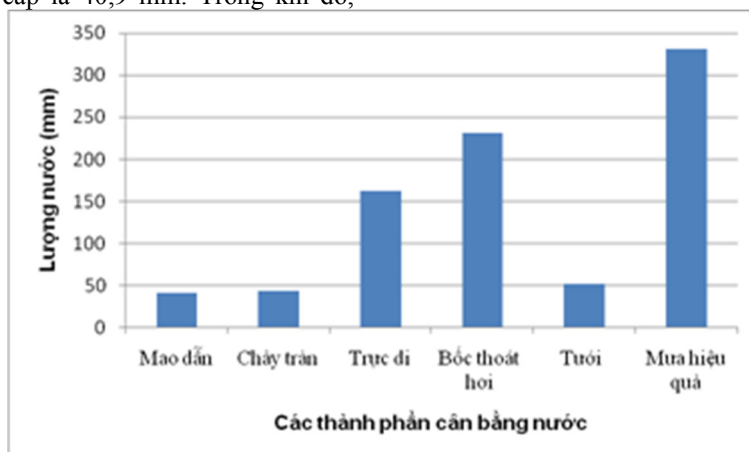


**Hình 5: Diễn biến ẩm độ đất mô phỏng và thực tế trong vòng 20 cm lớp đất mặt. Thanh đứng thể hiện độ lệch chuẩn của dữ liệu thực đo**

### 3.3.2 Đánh giá cân bằng nước

Kết quả mô phỏng các thành phần cân bằng nước trong toàn vùng rễ cho thấy tổng lượng mưa hiệu quả là 330,9 mm, chiếm 83,3% so với tổng lượng mưa (375,2 mm) trong suốt vụ trồng. Tổng lượng nước chảy tràn bề mặt là 44,3 mm. Tổng lượng nước tưới là 52,3 mm và tổng lượng mao dẫn từ mực thủy cấp là 40,9 mm. Trong khi đó,

tổng lượng nước bốc thoát hơi nước hiệu chỉnh là 231,6 mm thấp hơn so với tổng lượng nước bốc thoát hơi tối đa (264,92 mm) và tổng lượng nước trực di là 162,8 mm. (Hình 6). Trong suốt vụ trồng, độ mặn đất (ECe) trung bình cao hơn độ mặn ngưỡng cho sự phát triển của cây bắp (1,7 mS/cm) nên hệ số đáp ứng nước và độ mặn Ks nhỏ hơn 1 vì vậy làm giảm bốc thoát hơi nước hiệu chỉnh.



**Hình 6: Tổng lượng nước của các thành phần cân bằng nước trong suốt vụ trồng**

3.3.3 Cân bằng muối

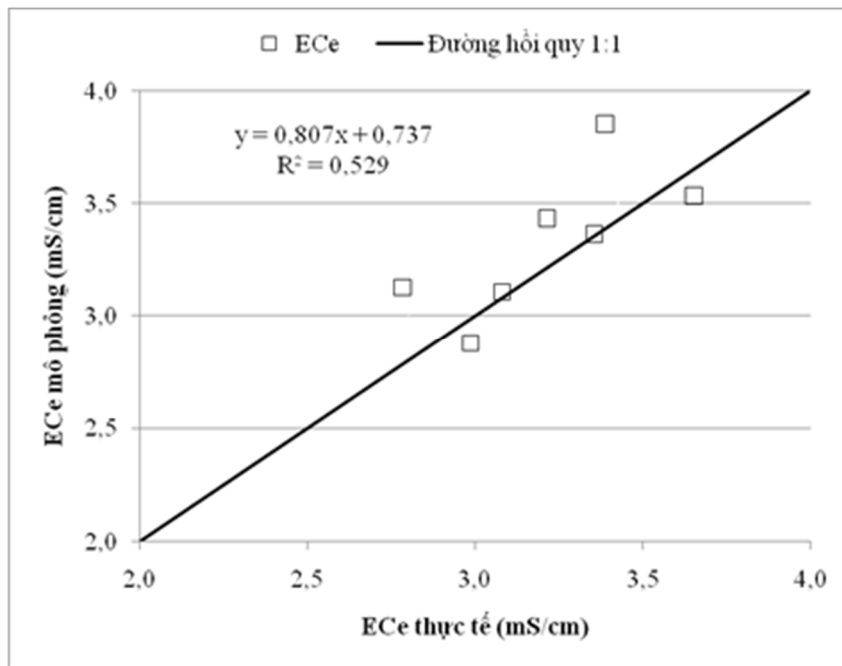
Kết quả so sánh độ mặn mô phỏng và thực tế cho thấy giá trị các thông số thống kê đều thấp (Bảng 9). Các giá trị khá rời đường tuyến tính 1:1 (Hình 7). Mặc dù vậy, hệ số mô hình EF khá gần 0 (EF = 0,19) vẫn cho thấy mô hình mô phỏng tốt giá trị trung bình độ mặn hơn là từng giá trị riêng lẻ. Cụ thể là độ mặn trung bình mô phỏng (3,33 mS/cm) rất gần với độ mặn trung bình thực tế (3,21 mS/cm). Nhìn chung, mô hình mô phỏng độ mặn vùng rẫy phản ánh tốt giá trị trung bình của độ mặn thực tế với các chỉ số thống kê có thể chấp nhận được với R<sup>2</sup> (0,53) trên 0,5, RMSE (0,24 mS/cm) khá gần 0 và NRMSE (7,49%) dưới 10%.

Nhìn chung, độ mặn mô phỏng và độ mặn đo được thực tế trong suốt vụ trồng đều cao hơn giá trị ngưỡng (1.7 mS/cm) cho sự giảm giảm năng suất cây bắp. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy nồng độ muối (Hình 8) trong vùng rẫy giảm so với thời điểm đầu vụ. Điều này có thể do lượng mưa xuất hiện

nhiều hơn vào cuối vụ, vì vậy một phần lượng muối vùng rẫy có thể được mang theo bởi lượng nước trực di xuống tầng bên dưới.

**Bảng 9: Độ mặn mô phỏng, thực tế và các chỉ số thống kê đánh giá kết quả mô phỏng.**

Ngày sau khi trồng	Nồng độ muối (g/l)	
	Mô phỏng	Thực tế
1	3,85	3,39
18	3,36	3,35
24	2,88	2,99
37	3,43	3,21
48	3,13	2,79
59	3,53	3,65
74	3,11	3,08
Trung bình	3,33	3,21
R <sup>2</sup>		0,52
RMSE (mS/cm)		0,24
NRMSE (%)		7,49
EF		0,19



**Hình 7: So sánh độ mặn mô phỏng và thực tế qua đường hồi quy 1:1**

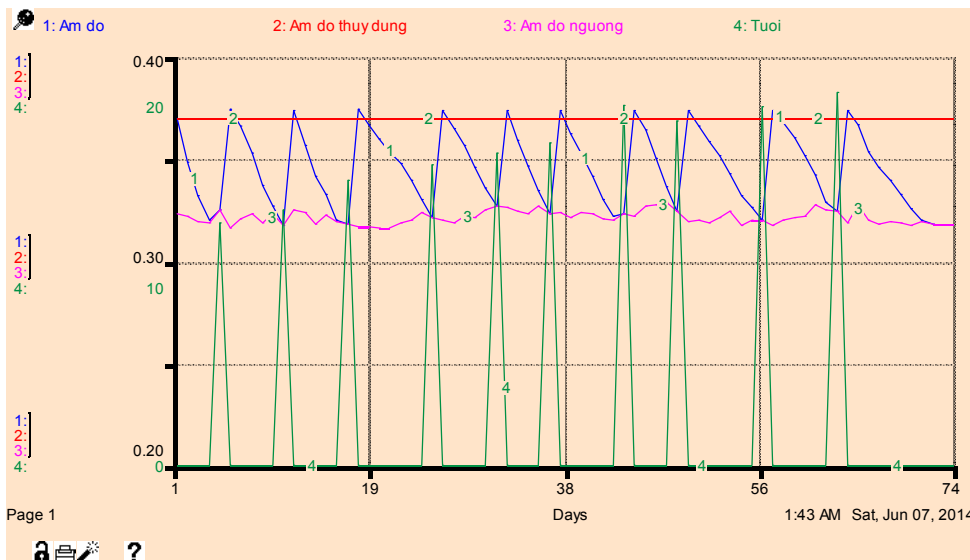


**Hình 8: Nồng độ muối mô phỏng và thực tế trong vòng 20 cm lớp đất mặt**

**3.3.4 Mô phỏng tưới tiết kiệm trong điều kiện không có mưa**

Trong trường hợp không có mưa, chế độ tưới tiết kiệm được thực hiện trong mô hình bằng cách tưới một lượng nước để đưa ẩm độ đất trở về ẩm độ thủy dung khi ẩm độ đất giảm đến ẩm độ ngưỡng đối với cây bắp ( $RAW = 0,5 \times TAW$ ) cộng với một lượng nước để ngăn ngừa muối tích lũy ở rễ. Trong trường hợp có tính đến lượng nước để

ngăn ngừa sự tích lũy muối vùng rễ, hệ số rửa mặn (LR) được tính vào. Với giả định là độ mặn trung bình của nước tưới ( $EC_w$ ) bằng 1 mS/m và độ mặn trích bão hòa ( $E_{ce}$ ) trung bình của đất là 3,35 mS/cm (giá trị mô phỏng ở Mục 3.1.3), khi đó tổng lượng nước cần tưới để đưa ẩm độ đất trở về ẩm độ thủy dung cộng với một lượng nước dùng cho rửa mặn (leaching) vùng rễ là 154,7 mm với 10 lần tưới và trung bình 5 ngày tưới một lần (Hình 9).



**Hình 9: Diễn biến ẩm độ đất trong trường hợp tưới tiết kiệm ở điều kiện không có**

**3.3.5 Các hạn chế của mô hình**

Do các yếu tố về dinh dưỡng đất chưa được đưa vào trong mô hình nên mô hình chỉ được ứng dụng

phù hợp trong điều kiện đất không bị hạn chế về dinh dưỡng. Ngoài ra, mô hình cũng chỉ được áp dụng phù hợp trong điều kiện đất không bị phèn vì

yếu tố giới hạn như độ chua của đất chưa bao gồm trong mô hình.

#### 4 KẾT LUẬN

Mô hình cân bằng nước và nồng độ muối vùng rễ cây bắp được xây dựng bằng phần mềm STELLA mô phỏng diễn biến âm độ đất có độ tin cậy cao với hệ số  $R^2 = 0,95$  cùng với hệ số hiệu quả mô hình khá cao ( $EF = 0,88$ ). Ngoài ra, các thông số về sai số trung bình của mô hình đều thấp với  $RMSE = 2,1$  mm và  $NRMSE = 2,84\%$  cho thấy mô hình có thể được sử dụng cho mục đích dự báo tưới tiêu cho canh tác cây bắp trong điều kiện đất bị nhiễm mặn.

Kết quả mô phỏng sự tích lũy muối vùng rễ cây bắp trong suốt vụ trồng cho thấy mô hình mô phỏng tốt độ mặn trung bình so với độ mặn thực tế. Độ mặn mô phỏng và thực tế trong suốt vụ trồng đều lớn hơn giá trị ngưỡng ( $1,7$  mS/cm) cho sự giảm năng suất bắp.

Kết quả mô phỏng cân bằng nước cho cây bắp có tưới cho thấy tổng lượng nước tưới trong suốt vụ trồng cần thiết là  $52,3$  mm, phù hợp với lượng nước tưới thực tế trong thí nghiệm.

Trong trường hợp mô phỏng tưới tiết kiệm trong điều kiện không có mưa, tổng lượng nước tưới là  $154,7$  mm với tần suất tưới trung bình là 5 ngày tưới một lần.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Allen, R.G., L.S. Pereira and D. Rease, 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No.56, United Nations – FAO, Rome, Italy. 300 p.
2. Blankenship, V. and Tumlinson, J., 1995. A STELLA-II teaching simulation of the dynamics of action model. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, vol. 27, pp. 344-250.
3. Brouwer, C. and Heibloem, M., 1986. Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. Training manual no. 3. FAO Land and Water Development Division. Rome, Italy.
4. Brouwer, C. and Prins, K., 1989. Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling. Training manual no.4. FAO, Rome, Italy.
5. Critchley, W and Siegert, K., 1991. Water harvesting. A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes

- for Plant Production. Water Resources Engineer Land and Water Development Division FAO, Rome, Italy.
6. Evans, R., Cassel, D.K. and Sneed, R.E., 1996. Soil, water and crop characteristics important to irrigation scheduling. North Carolina Cooperative Extension Service. Publication no.: AG452-1. <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag452-1.html>
7. Garcia de Bullen, P., Jindal, R. and Tantrakarnapa, K., 2011. Modeling of Cadmium removal from domestic wastewater in constructed wetlands using STELLA simulation program. Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste, Volume 15, Issue 2.
8. Jacovides, C.P., and Kontoyiannis, H., 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. Agricultural Water Management, pp: 365–371.
9. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W.V., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of The ASABE, pp: 885–900.
10. Naimi, B. and Voinov, A., 2012. StellaR: A software to translate Stella models into R open-source environment. Volume 38, pp: 117-118.
11. Ngô Ngọc Hưng, 2009. Tính chất tự nhiên và những tiến trình làm thay đổi độ phì nhiêu đất Đồng bằng sông Cửu Long. Nhà xuất bản Nông nghiệp. 470 trang.
12. Ouyang, Y., 2008. Modeling the mechanisms for uptake and translocation of dioxane in a soil-plant ecosystem with STELLA. Journal of Contaminant Hydrology, volume 95, Issues 1-2, pp: 17-29.
13. Ouyang, Y., Zhang, J.E., Lin, D. and Liu, G.D., 2010. A STELLA model for the estimation of atrazine runoff, leaching, adsorption, and degradation from an agricultural land. Soil sediments. J Soils Sediments, vol.10, pp. 263-271.
14. Raes, D. 1982. A summary simulation model of the water budget of a cropped soil. Dissertationes de Agricultura n° 122.

- K.U.Leuven University, Leuven, Belgium. 110p.
15. Raes, D., 2002. Budget – A soil water and salt balance model. Reference manual. K.U Leuven, Belgium.
  16. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, C. and Fereres, E., 2012. AquaCrop, version 4.0, reference manual. FAO, Rome, Italy.
  17. Ruth, M. and Hannon, B., 2001. Dynamic modeling. Springer, New York, second edition, 401 pages.
  18. Steenhuis, T.S., Winchell, M., Rossing, J., Zollweg, J.A. and Walter, M.F., 1995. SCS Runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of Irrigation and Drainage Eng.* 121(3): 234-238.
  19. Tekwal, I.J. and Bwade, E.K., 2011. Estimation of Irrigation Water Requirement of Maize (*Zea-mays*) using Pan Evaporation Method in Maiduguri, Northeastern Nigeria. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal*. Manuscript No.1552. Vol.13, No.1, 2011. Provisional PDF Version.
  20. United States Department of Agriculture (USDA), 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall. *National Engineering Handbook*, Washington DC, USA. Section 4 Hydrology, Chapter 10, pp. 1–24.
  21. Zhang, L. and Mitsch, W., 2005. Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. *Environmental Modelling & Software*, Volume 20, Issue 7, pp: 935-946.