

Research Article



CrossMark

Open Access

간척지 재배 근채류의 최대엽장과 엽폭을 이용한 지하부 생체중 추정용 회귀 모델 결정

정대호¹, 이평호¹, 이인복^{1*}

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 원예특작환경과

Determination of Regression Model for Estimating Root Fresh Weight Using Maximum Leaf Length and Width of Root Vegetables Grown in Reclaimed Land

Dae Ho Jung¹, Pyoung Ho Yi¹ and In-Bog Lee^{1*} (¹Horticultural and Herbal Crop Environment Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 11 July 2020/ Revised: 23 July 2020/ Accepted: 31 July 2020

Copyright © 2020 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Dae Ho Jung

<https://orcid.org/0000-0002-6483-8123>

Pyoung Ho Yi

<https://orcid.org/0000-0002-9444-3085>

In-Bog Lee

<https://orcid.org/0000-0003-3305-1691>

Abstract

BACKGROUND: Since the number of crops cultivated in reclaimed land is huge, it is very difficult to quantify the total crop production. Therefore, a non-destructive method for predicting crop production is needed. Salt tolerant root vegetables such as red beets and sugar beet are suitable for cultivation in reclaimed land. If their underground biomass can be predicted, it helps to estimate crop productivity. Objectives of this study are to investigate maximum leaf length and weight of red beet, sugar beet, and turnips grown in reclaimed land, and to determine optimal model with regression analysis for linear and allometric growth models. **METHODS AND RESULTS:** Maximum leaf length, width, and root fresh weight of red beets, sugar beets, and turnips were measured. Ten linear models and six allometric growth models were selected for estimation of root fresh weight and non-linear regression analysis was conducted. The allometric growth model, which have a variable multiplied by square of maximum leaf length and maximum leaf width, showed highest R^2 values of 0.67, 0.70, and 0.49 for red beets, sugar

beets, and turnips, respectively. Validation results of the models for red beets and sugar beets showed the R^2 values of 0.63 and 0.65, respectively. However, the model for turnips showed the R^2 value of 0.48. The allometric growth model was suitable for estimating the root fresh weight of red beets and sugar beets, but the accuracy for turnips was relatively low.

CONCLUSION: The regression models established in this study may be useful to estimate the total production of root vegetables cultivated in reclaimed land, and it will be used as a non-destructive method for prediction of crop information.

Key words: Belowground biomass, Red beet, Regression analysis, Sugar beet, Turnip

서론

국토 면적이 협소한 나라에서는 주로 간척을 통해 부족한 토지를 확보한다. 해안선에 굴곡이 많고 갯벌이 발달한 지역은 간척에 유리하며, 한국과 네덜란드 등에 이러한 지형이 많이 분포한다. 최근 농업단지와 공항 등의 부지로 활용하고자 간척을 실시하는 경우도 늘고 있지만, 간척지는 주로 대량의 식량을 생산하기 위한 경작지로 활용되어 왔다[1, 2]. 그러나 간척지의 높은 염 농도는 작물 재배에 여러 문제를 일으킨다. 염에 의한 피해를 입은 작물은 광합성과 생육이 억제되고, 엽록소 함량이 감소하며, 영양 불균형이 일어나는 등의 증상을

*Corresponding author: In-Bog Lee

Phone: +82-63-238-6340; Fax: +82-63-238-6305;

E-mail: imiblee@korea.kr

나타낸다[3, 4]. 염 피해는 주로 수분 포텐셜 감소에 따른 수분 흡수 저해와 특정 이온의 체내 축적에 의한 독성에 의해 발생한다[5, 6]. 따라서 간척지에서는 염 피해에 강한 내염성 작물을 재배할 필요가 있다.

작물의 내염성은 과도한 염의 영향을 견딜 수 있는 능력을 말하며, 염 피해에 강한 것으로 알려진 작물로는 목화나 보리, 시금치, 비트, 사탕무 등이 있다[7, 8]. 레드 비트(*Beta vulgaris* L.)는 명아주과(Chenopodiaceae)에 속하는 지중해 원산의 뿌리 채소로 내염성이 강하고 염소 흡수가 활발한 작물로 알려져 있다[9]. 레드 비트의 식용 부위는 자주색을 나타내는 비대한 뿌리이며, 당분 함량이 높고 비타민이 풍부하여 건강식으로 각광받고 있다[10, 11]. 사탕무(*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris*)는 유럽과 아시아, 미국 등지에서 설탕과 바이오 연료 수급을 목적으로 재배하며, 뿌리의 당분 함량이 최대 24.8%까지 나타나는 것으로 보고되었다[8, 12]. 사탕무는 발아 시기와 유묘 단계에는 내염성이 낮은 것으로 알려져 있으나, 성숙 후에는 내염성이 강해진다[13]. 순무(*Brassica rapa* var. *rapa* L.)는 유럽 원산의 뿌리 채소로 내염성이 중약 등급으로 알려져 있다[6]. 그러나 순무는 배추과(Brassicaceae)에 속하는 작물이기에 이차대사산물인 글루코시놀레이트를 다량 함유하므로 염에 대한 반응을 살펴보아야 한다. 따라서 비트, 사탕무, 순무 등과 같은 근채류들은 간척지에 적합한 생리적 특성을 가진 경제 작물이며, 재배 방식과 생산량에 대한 정밀한 연구가 필요하다.

간척지와 같은 넓은 면적의 농경지에서 재배되는 작물의 생산량은 전수조사를 통해 확인하기 어렵다. 따라서 생산량 예측을 위해 사용할 수 있는 생육 예측 지표를 결정하고, 둘 사이의 관계를 정량적으로 표현할 필요가 있다. 이를 위해 모델링 기법을 사용하면 생육 지표와 생산량 관계를 수학적으로 표현할 수 있게 된다[14]. 엽면적과 엽 생체중, 엽 건물중 등은 작물의 광합성에 중요한 역할을 하는 지표로 사용할 수 있으며, 더 나아가 작물 생육과 과수의 과실 생산량 예측의 지표로도 사용할 수 있다[15, 16]. 그러나 엽 생체중이나 건물중을 측정하기 위해서는 작물을 파괴하여 조사해야 하는 문제점이 있다. 따라서 작물 재배 중에 측정할 수 있는 비파괴적인 방식의 지표로 엽장과 엽폭 등을 사용하게 되었다[17, 18]. 특히 수목의 경우 지상부 생체량을 추정하기 위한 비파괴적 지표로 흉고직경(Diameter at breast height)을 주로 사용하고 있다[19]. 또한, 수목에서는 토양 속에 묻혀 있기 때문에 정확한 추정이 어려운 지하부 생체량을 파악하기 위한 목적으로 흉고직경 등을 변수로 하는 다양한 모델식이 사용되고 있다. 널리 사용되는 지하부 생체량 추정 모델로는 선형 모델(Linear model)이나 거듭제곱 형태의 상대성장 모델(Allometric growth model) 등이 있다[20, 21]. 상대성장 모델은 식물의 지상부/지하부에 대한 수학적 모델로부터 확립되었다[22]. [23, 24]의 조사에 따르면, 지하부 생체량 추정을 위해 25종의 수목에 대해 흉고직경과 수고를 변수로 하는 선형 모델 4종과 상대성장 모델 3종이 사용된 바 있다. 뿌리 부분을 식용 등의 목적으로 활용하는 근채류는 지하부 생체중 추정이 타 작물에 비해 상대적으로 중요하다. 또한 근채류는 토양 속에

활용 부위인 뿌리가 묻혀 있기 때문에 시각적으로 추정하는 것이 어렵다. 따라서 근채류에 대한 비파괴적 방식의 지하부 생체중 추정은 대규모 재배 시 유용하게 사용될 것이라 판단된다. 그러나 현재까지 근채류의 비파괴적 방식을 통한 지하부 생체중 예측은 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 간척지에서 재배한 레드 비트와 사탕무, 순무의 최대 엽장과 엽폭, 지하부 생체중을 조사하고, 선형 모델과 상대성장 모델에 대해 회귀 분석을 실시하여 최대 엽장과 엽폭을 변수로 하는 최적의 지하부 생체중 추정 모델을 결정하고자 하였다.

재료 및 방법

작물 재배 조건

실험 대상인 근채류 3종(레드 비트와 사탕무, 순무)은 전라북도 김제시 광활면 새만금 간척지의 시험 포장(35.8°N, 126.7°E)에서 재배하였다. 작물 재배 전 토양의 EC와 Na 이온 농도는 각각 0.54 dS·m⁻¹과 0.51 cmol⁺·kg⁻¹이었다. 작물 정식을 위해서 20 cm 높이의 두둑을 만들어 점적 호스를 설치하였으며 검은 비닐을 이용하여 멀칭하였다. 레드 비트는 과종 후 약 30일이 지난 유묘를 5월 29일에 30 cm×30 cm 간격으로 정식하였다. 사탕무와 순무는 각각 2019년 8월 21일과 16일에 30 cm×30 cm 간격으로 종자를 직파하였다. 레드 비트와 사탕무, 순무에는 농촌진흥청 표준 시비법에 따라 질소-인산-칼리를 기준으로 각각 55, 30, 30 kg·ha⁻¹과 234, 51, 81 kg·ha⁻¹, 234, 51, 81 kg·ha⁻¹를 사용하였다. 레드 비트와 사탕무, 순무에 대해 기비로 요소와 용성인비, 염화칼리를 각각 28, 30, 15 kg·ha⁻¹과 84, 51, 41 kg·ha⁻¹, 84, 51, 41 kg·ha⁻¹를 시비하였으며, 추비는 요소와 염화칼리를 이용하여 부족분의 50%에 해당하는 양을 정식 후 20일과 40일차에 각각 시비하였다. 작물 재배 기간 동안 텐시오미터(Irrrometer Model-R, Riverside, CA, USA)를 이용하여 토양 수분 장력 -30 kPa 수준으로 관수하였다. 레드 비트와 사탕무, 순무는 각각 2019년 7월 29일과 10월 24일, 10월 24일에 수확하였다.

생육 지표 측정

지하부 생체중 추정을 위한 지표로 레드 비트와 사탕무, 순무의 최대 엽장과 엽폭을 각각 98, 125, 111개체에 대하여 측정하였다(Table 1). 여러 장의 잎 중 생육이 충분히 진전된 성엽에 대해서만 측정을 실시하였다. 굴곡이 있거나 휘어진 잎에 대해서는 평평하게 누른 후 측정하였다. 엽폭은 엽장 측정 방향과 직각을 이루는 방향으로 측정하였으며, 잎의 중간 부분에서 나타나는 최대 길이를 최대 엽폭으로 결정하였다. 이어서 지상부를 모두 제거하였으며, 최대 엽장과 엽폭을 이용하여 추정할 대상인 지하부 생체중을 측정하였다.

회귀 모델 선정

[23, 24]가 정리한 기존의 모델을 포함하여 지하부 생체중을 추정하기 위한 회귀 모델 16종을 선정하였다(Table 2). 회

Table 1. Statistical summary for number of sample plants (n), maximum leaf length (L_M), maximum leaf width (W_M), and root fresh weight (RFW) for red beet, sugar beet, and turnip

	n	L_M (cm)	W_M (cm)	RFW (g)
Red beet	98	27.2±0.79 ^z	7.8±0.31	37.1±4.45
Sugar beet	125	44.0±0.94	1.4±0.03	222.4±16.81
Turnip	111	41.6±0.61	14.2±0.28	246.3±17.79

^z Each value represents the mean ± standard error.

Table 2. Regression models to estimate root fresh weight (RFW) for red beet, sugar beet, and turnip

Equation number	Regression model
Linear model using single variable	
(1)	$RFW = a * L_M + b^z$
(2)	$RFW = a * L_M^2 + b * L_M + c$
(3)	$RFW = a * L_M^3 + b * L_M^2 + c * L_M + d$
(4)	$RFW = a * W_M + b$
(5)	$RFW = a * W_M^2 + b * W_M + c$
(6)	$RFW = a * W_M^3 + b * W_M^2 + c * W_M + d$
Allometric model using single variable	
(7)	$RFW = a * L_M^b$
(8)	$RFW = a * W_M^b$
Linear model using multiple variable	
(9)	$RFW = a * L_M * W_M + b$
(10)	$RFW = a * (L_M + b) * (W_M + c)$
(11)	$RFW = a * (L_M^2 + b * L_M + c) * (W_M^2 + d * W_M + e)$
(12)	$RFW = a * (L_M^3 + b * L_M^2 + c * L_M + d) * (W_M^3 + e * W_M^2 + f * W_M + g)$
Allometric model using multiple variable	
(13)	$RFW = a * (L_M * W_M)^b$
(14)	$RFW = a * (L_M^2 * W_M)^b$
(15)	$RFW = a * (L_M * W_M^2)^b$
(16)	$RFW = a * (L_M^2 * W_M^2)^b$

^z L_M is maximum leaf length (cm), W_M is maximum leaf width (cm), RFW is root fresh weight (g), and a to g are regression coefficients.

귀 모델은 최대 엽장(L_M)과 최대 엽폭(W_M)을 변수로 하여 지하부 생체중(RFW)을 추정하기 위한 형태로 구성되었다. 모델은 총 네 종류이며, 단일 변수를 사용하는 선형 모델(Eqn. (1)–(6))과 상대성장 모델(Eqn. (7)과 (8)), 복합 변수를 사용하는 선형 모델(Eqn. (9)–(12))과 상대성장 모델(Eqn. (13)–(16))로 구분되었다. 선형 모델은 그 형태가 간결하여 다양한 분야에서 널리 사용되며, 상대성장 모델은 수목의 지하부 생체중 추정에 가장 널리 사용되는 형태이다. 수목에 대한 지하부 생체중 추정에 흉고직경의 제곱에 수고를 곱한 값을 변수로 사용하는 경우가 보고되었기 때문에, 본 연구에서도 최대 엽장과 엽폭의 제곱항을 가진 모델(Eqn. (14)–(16))을 사용하였다.

선정한 16종의 모델에 포함된 회귀 계수를 결정하고자 SPSS 통계 프로그램(IBM, New York, NY, USA)을 이용하여 비선형 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석에는 레드 비트와 사탕무, 순무에서 측정된 전체 데이터 중 65, 84, 74개의 개체에서 측정된 결과를 이용하였다. 실측 데이터와 모델이 예측한 값의 비교를 위하여 Sigmaplot(Systat Software, San Jose, CA, USA)을 이용하여 그래프를 작성하였다. 회귀분석 결과 결정계수인 R^2 값이 가장 높게 나타나는 모델을 적합 모델로 선정하였으며, R^2 값이 같은 경우 평균제곱근오차(RMSE) 값이 낮은 모델을 선정하였다.

선정 회귀 모델 검증

16종의 회귀 모델 중 R^2 값과 RMSE 값을 고려하여 통계적으로 가장 신뢰도가 높은 모델을 1종 선택하여 검증을 수행하였다. 검증에는 레드 비트와 사탕무, 순무에서 측정된 전체 데이터 중 모델을 선정하는데 사용하지 않은 33, 41, 37개의 개체에서 측정된 결과를 이용하였다. 최대 엽장과 엽폭을 이용하여 모델을 통해 계산된 지하부 생체중 값과 실제로 측정된 지하부 생체중 값을 1:1 선상에서 회귀분석을 실시하였으며, R^2 값과 RMSE 값을 이용하여 모델의 신뢰도를 검증하였다.

결과 및 고찰

최대 엽장과 엽폭, 지하부 생체중의 관계

레드 비트와 사탕무, 순무 중 최대 엽장은 사탕무에서 가장 큰 것으로 나타났으나, 최대 엽폭과 지하부 생체중은 순무에서 가장 크게 나타났다(Table 1). 레드 비트와 사탕무, 순무에서 측정된 최대 엽장과 엽폭, 지하부 생체중 값의 관계를 3차원 공간상에 나타내었다(Fig. 1). 최대 엽장과 엽폭이 증가함에 따라 지하부 생체중은 증가하는 양상을 보였다. 레드 비트의 최대 엽장과 엽폭은 12.0–43.9 cm와 2.5–15.9 cm의

범위에 있었으며, 지하부 생체중은 0.5–197.0 g의 범위에 있었다. 화분에서 재배한 기존 연구에서 레드 비트의 평균 지하부 생체중이 85.35–134.62 g으로 나타난 결과와 비교할 때, 본 연구에서 재배한 레드 비트의 생육은 정상적인 수준인 것으로 판단되었다[25].

사탕무의 최대 엽장과 엽폭은 12.0–69.0 cm와 0.5–2.7 cm의 범위에 있었으며, 지하부 생체중은 1.0–971.0 g의 범위에 있었다. 60일에 걸쳐 재배한 기존 연구에서 Monogerm hybrid 품종 사탕무의 지하부 생체중은 약 70 g으로 보고되었다[26]. 본 연구에서는 Turkey 품종 사탕무의 지하부 생체중이 평균 232.6 g으로 나타났으며, 품종에 의한 생육의 차이와 시비에 의한 효과로 지하부 생체중이 증진된 것으로 보였다. 추가적으로 사탕무 재배 시 질소 기준 $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 의 비료를 사용한 경우 120일차에 지하부 생체중이 평균 408.0 g으로 보고되었다[27]. 따라서 본 연구에서 재배한 사탕무의 생육은 정상적인 수준으로 판단되었다.

순무의 최대 엽장과 엽폭은 27.5–58.8 cm와 8.7–22.5 cm의 범위에 있었으며, 지하부 생체중은 18.0–1066.0 g의 범위에 있었다. 기존 연구에서 Snow ball 품종 순무를 60일간 수경 재배한 경우와 화분 재배한 경우 각각 지하부 생체중이 최대 110.0 g과 115.3 g으로 보고되었다[28, 29]. 본 연구에서는 강화 품종

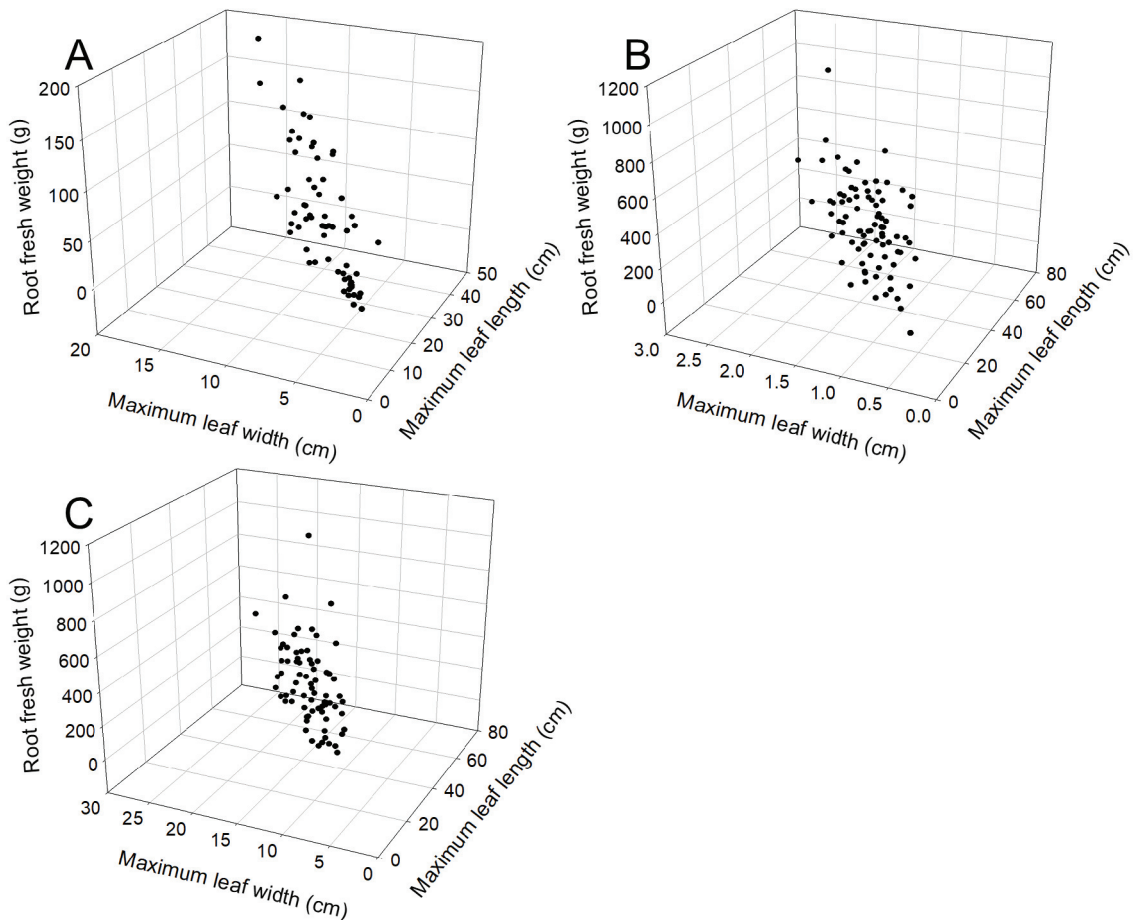


Fig. 1. Relationships among maximum leaf length, maximum leaf width, and root fresh weight of red beet (A), sugar beet (B), and turnip (C).

순무의 지하부 생체중이 평균 263.2 g으로 나타나, 간척지 환경에서 재배된 강화 품종 순무의 생육이 수경 또는 화분 재배한 Snow ball에 비해 좋은 것으로 판단되었다.

지하부 생체중 추정 모델의 선정

레드 비트의 최대 엽장과 엽폭을 이용하여 지하부 생체중을 추정할 16종 모델의 회귀분석 결과 복합 변수를 이용한 상대생장 모델의 R^2 값이 모두 0.66 이상으로 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 3). 복합 변수를 이용한 선형 모델 중에서는 Eqn. (12)에서 R^2 값이 0.59로 최대값을 나타냈으나, 식의 형태가 복잡할 뿐 아니라 상대생장 모델에 비해 예측력이 부족하여 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 복합 변수를 이용한 상대생장 모델 중에서 최대 엽장의 제곱과 최대 엽폭을 곱한 값을 변수로 하는 Eqn. (14)는 R^2 의 최대값인 0.67, RMSE의 최소값인 28.620을 나타내어 가장 적합한 모델로 선정되었다. Eqn. (14)를 이용하여 실험 범위 내에서 레드 비트의 지하부 생체중을 예측하도록 3차원 공간상에 그래프를 작성한 결과 실측 데이터의 경향을 잘 표현해주는 것으로 판단되었다(Fig. 2A).

사탕무의 최대 엽장과 엽폭을 이용하여 지하부 생체중을 추정할 16종 모델의 회귀분석 결과 복합 변수를 이용한 상대생장 모델의 R^2 값이 모두 0.63 이상으로 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 4). 복합 변수를 이용한 선형 모델 중에서는 Eqn. (12)에서 R^2 값이 0.46으로 최대값을 나타냈으나, 상대생장 모델에 비해 예측력이 크게 부족하여 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 단일 변수를 이용한 상대생장 모델 중 Eqn. (7)과 복합 변수를 이용한 상대생장 모델 중 Eqn. (14)에서 R^2 은 최대

값인 0.70을 나타내었으나, Eqn. (14)에서 RMSE의 최소값인 108.530을 나타내어 가장 적합한 모델로 선정되었다. Eqn. (14)를 이용하여 실험 범위 내에서 사탕무의 지하부 생체중을 예측하도록 3차원 공간상에 그래프를 작성한 결과 실측 데이터의 경향을 잘 표현해주는 것으로 판단되었다(Fig. 2B).

순무의 최대 엽장과 엽폭을 이용하여 지하부 생체중을 추정할 16종 모델의 회귀분석 결과 복합 변수를 이용한 상대생장 모델의 R^2 값이 모두 0.42 이상으로 가장 적합한 것으로 나타났다(Table 5). 순무에 적용한 모델들 중 Eqn. (14)에서 R^2 의 최대값인 0.49을 얻었지만, 레드 비트와 사탕무에 비해 전체적으로 모든 모델의 예측력이 부족한 것으로 판단되었다. Eqn. (14)를 이용하여 실험 범위 내에서 순무의 지하부 생체중을 예측하도록 3차원 공간상에 그래프를 작성한 결과, 순무의 최대 엽장이 60 cm가 넘는 경우에 실측 데이터의 값과 계산된 값이 일치하지 않는 현상을 확인할 수 있었다(Fig. 2C).

60종의 수목에 관한 기존 연구에서 지하부 생체중을 추정하기 위해 흉고직경을 변수로 하는 상대생장 모델을 회귀분석하였을 때, R^2 값이 최저 0.68으로 나타났다[21]. 본 연구에서 레드 비트와 사탕무는 이와 유사한 수준의 정확도를 보이는 것으로 판단되었다. 반면, [30]은 몬터레이 파인 종 수목의 지하부 생체중을 추정하기 위해 흉고직경을 변수로 하는 상대생장 모델을 적용하면 R^2 값이 0.90 이상으로 나타남을 보고하였다. 따라서 근채류의 지하부 생체중 추정을 위해 최대 엽장과 엽폭을 사용하는 것이 수목의 지하부 생체중 추정을 위해 흉고직경을 사용하는 것에 비해 낮은 정확도를 나타내게 된 원인으로 해석할 수 있다. 그러나 근채류의 경우 수목의 흉고직경에 해당하는 지표가 없는 상황이었고, 본 연구를

Table 3. Coefficient values, determination coefficient (R^2), and root mean square error (RMSE) of regression models to estimate root fresh weight (RFW) for red beet

Equation number ^z	a	b	c	d	e	f	g	R^2	RMSE (g)
(1)	3.78	-61.98						0.42	36.0
(2)	0.05	1.19	-28.71					0.43	35.9
(3)	-0.01	0.53	-11.80	79.99				0.44	37.2
(4)	10.53	-41.56						0.51	33.4
(5)	0.85	-3.52	8.27					0.54	32.1
(6)	0.07	-1.15	12.89	-30.64				0.55	33.3
(7)	2.97×10^{-6}	4.71						0.64	29.6
(8)	1.92×10^{-2}	3.35						0.64	29.6
(9)	0.23	-12.75						0.53	34.2
(10)	0.28	-0.20	-3.29					0.54	33.9
(11)	-0.01	-76.96	928.90	-10.55	53.31			0.57	32.9
(12)	-6.91×10^{-8}	98.97	3.17×10^3	-3.39×10^4	8.84×10^3	-2.18×10^4	-1.97×10^4	0.59	32.0
(13)	3.01×10^{-4}	2.05						0.67	28.6
(14)	6.20×10^{-5}	1.45						0.67	28.6
(15)	1.35×10^{-3}	1.28						0.66	28.8
(16)	3.01×10^{-4}	1.03						0.67	28.6

^z See Table 2 for the equation number.

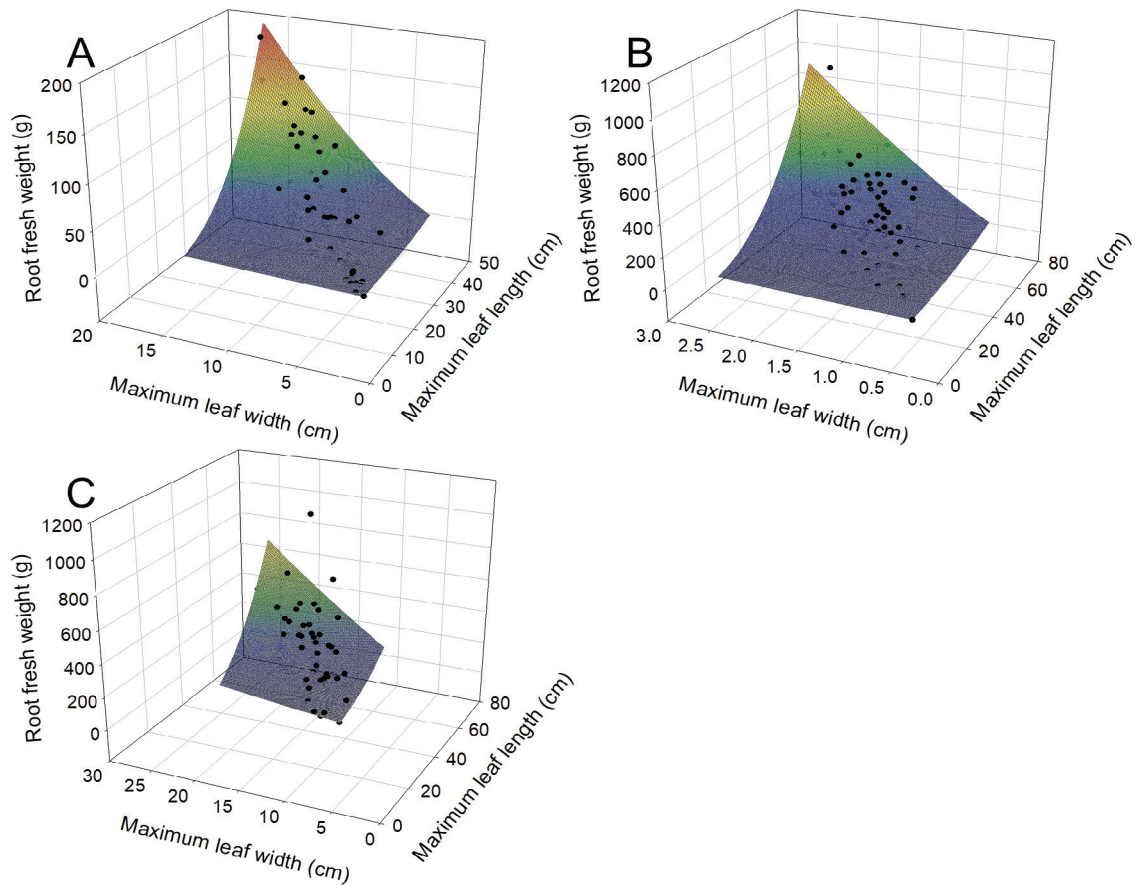


Fig. 2. Comparison of measured (black dot) and estimated (colored mesh) root fresh weights of red beet (A), sugar beet (B), and turnip (C) using regression model with highest R^2 value (Eqn. (14)).

Table 4. Coefficient values, determination coefficient (R^2), and root mean square error (RMSE) of regression models to estimate root fresh weight (*RFW*) for sugar beet

Equation number ^z	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	R^2	RMSE (g)
(1)	10.67	-261.03						0.40	142.5
(2)	0.11	1.23	-67.68					0.41	141.3
(3)	0.00	-0.16	11.40	-185.27				0.41	141.2
(4)	148.35	1.77						0.22	161.9
(5)	-51.85	392.91	-237.67					0.30	153.4
(6)	-23.73	134.05	4.56	-5.21				0.31	152.3
(7)	1.59×10^{-4}	3.62						0.70	109.0
(8)	51.32	2.89						0.51	130.4
(9)	2.96	11.05						0.37	145.7
(10)	2.77	-22.48	1.84					0.44	137.5
(11)	-0.01	130.05	-2.93×10^3	-24.65	-33.53			0.44	137.3
(12)	0.01	-140.52	6.70×10^3	-9.84×10^4	-10.55	39.13	-15.31	0.46	135.4
(13)	7.22×10^{-2}	1.83						0.67	111.7
(14)	6.92×10^{-3}	1.25						0.70	108.5
(15)	7.87×10^{-1}	1.16						0.63	116.8
(16)	7.22×10^{-2}	0.92						0.67	111.7

^z See Table 2 for the equation number.

통해 최대 엽장과 엽폭을 이용할 수 있다는 사실을 확인하였다. 더 높은 정확도를 갖는 모델을 선정하기 위해서 최대 엽장과 엽폭 외에도 사용할 수 있는 지표를 찾는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

선정된 지하부 생체중 추정 모델의 검증

레드 비트와 사탕무의 지하부 생체중을 표현하는 모델 중 가장 신뢰도가 높은 Eqn. (14)를 이용하여 검증한 결과, R^2 는 각각 0.63과 0.65로 나타나 모델의 예측력이 신뢰할 수 있는 수준인 것으로 판단되었다(Fig. 3A와 3B). 반면 순무의 지하부 생체중을 표현하는 모델 중 가장 신뢰도가 높은 Eqn. (14)를 이용하여 검증한 결과, R^2 는 0.48으로 나타나 모델의 예측력이 레드 비트와 사탕무에 비해 낮은 것으로 판단되었다(Fig. 3C). 선정한 모델의 정확도가 작물별로 다른 이유는 대상 작물의 영양학적 상태와 스트레스 반응이 서로 다르기 때문인 것으로 보인다.

식물의 구조를 형성하는 탄소의 이동은 일반적으로 잎에서 줄기를 거쳐 뿌리를 향하는 단일 방향 흐름을 보이는 반면, 질소는 탄소와 달리 뿌리에서 흡수되어 지상부로 이동하는 것으로 알려져 있다. 이 두 원소의 이동량과 사용량에 따라 식물의 지상부와 지하부의 비율이 결정된다[31, 32]. 따라서 작물의 지상부와 지하부의 비율은 체내의 탄소와 질소 비율에 따라 달라질 수 있다[20]. 이를 정확하게 확인하기 위해서는 간척지 재배 환경에서 작물의 탄소와 질소 함량을 추적하는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

레드 비트는 내염성이 높은 것으로 알려진 반면, 순무의 내

염성은 약한 편이기 때문에 간척지 환경 하에서 재배한 근채류들 간의 생육 반응이 다를 수 있다. 기존 연구에 따르면 간척지에서 재배한 레드 비트는 전기전도도가 높아질수록 잎과 뿌리의 길이가 짧아지고 지하부 생체중이 감소하지만, 순무는 전기전도도가 높아질수록 잎과 뿌리의 길이가 짧아지고 지하부 생체중은 증가하는 경향을 가진다[6]. 따라서 염에 대한 작물의 반응이 종마다 서로 다르기 때문에 같은 모델을 적용하더라도 정확도가 작물별로 다르게 나타나는 것으로 보인다. 본 연구를 수행한 간척지는 EC와 Na 이온 농도가 근채류 재배에 적합한 수준이었다. 또한 간척지에서는 염 외에도 지상부 생육에 영향을 미치는 강한 바람과 지하부 생육에 영향을 미치는 토양 구조 불량 문제 등이 발생한다[2]. 따라서 품종별로 간척지 환경에 적응하는 정도가 다르며, 같은 품종이라도 비료 등의 투입으로 인한 재배 조건에 따라 지상부와 지하부의 생육 비율이 달라지기 때문에 본 연구에서 확립한 모델의 정확도에 영향을 미쳤을 것이다.

식물의 생육을 전수조사하는 것은 시간과 노동력이 많이 필요하기 때문에, 다양한 식물에 대해 비파괴적 방식을 이용하여 생육량을 추정하려는 연구가 진행되고 있다[33, 34]. 최근에는 발달하고 있는 영상 처리 기술과 원격 센싱 기술을 이용하여 작물의 생체량과 질소 함량과 같은 생체 정보를 비파괴적으로 조사할 수 있게 되었다[35]. 본 연구에서 확립한 회귀 모델은 간척지 재배 근채류의 생산량을 예측하는데 유용할 것이며, 비파괴적 생체 정보 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 5. Coefficient values, determination coefficient (R^2), and root mean square error (RMSE) of regression models to estimate root fresh weight (RFW) for turnip

Equation number ^z	a	b	c	d	e	f	g	R^2	RMSE (g)
(1)	16.90	-453.78						0.30	168.9
(2)	-0.22	35.19	-822.65					0.31	168.4
(3)	-0.06	7.81	-296.41	3.63×10^3				0.33	165.2
(4)	28.14	-143.39						0.19	182.0
(5)	-2.16	92.33	-601.90					0.20	180.4
(6)	0.23	-12.65	247.56	-1.34×10^3				0.21	180.1
(7)	8.68×10^{-5}	3.92						0.45	151.5
(8)	3.70×10^{-1}	2.37						0.33	165.8
(9)	0.48	-34.67						0.25	174.8
(10)	0.03	-26.75	658.68					0.30	168.9
(11)	-8.02×10^{-7}	-120.73	2.63×10^3	1.16×10^4	3.27×10^5			0.31	167.9
(12)	1.63×10^{-8}	-3.75×10^4	5.15×10^6	-1.17×10^8	-51.66	872.11	-4.31×10^3	0.33	166.1
(13)	3.39×10^{-3}	1.72						0.46	150.5
(14)	6.71×10^{-4}	1.24						0.49	146.6
(15)	1.84×10^{-2}	1.03						0.42	155.4
(16)	3.39×10^{-3}	0.86						0.46	150.5

^z See Table 2 for the equation number.

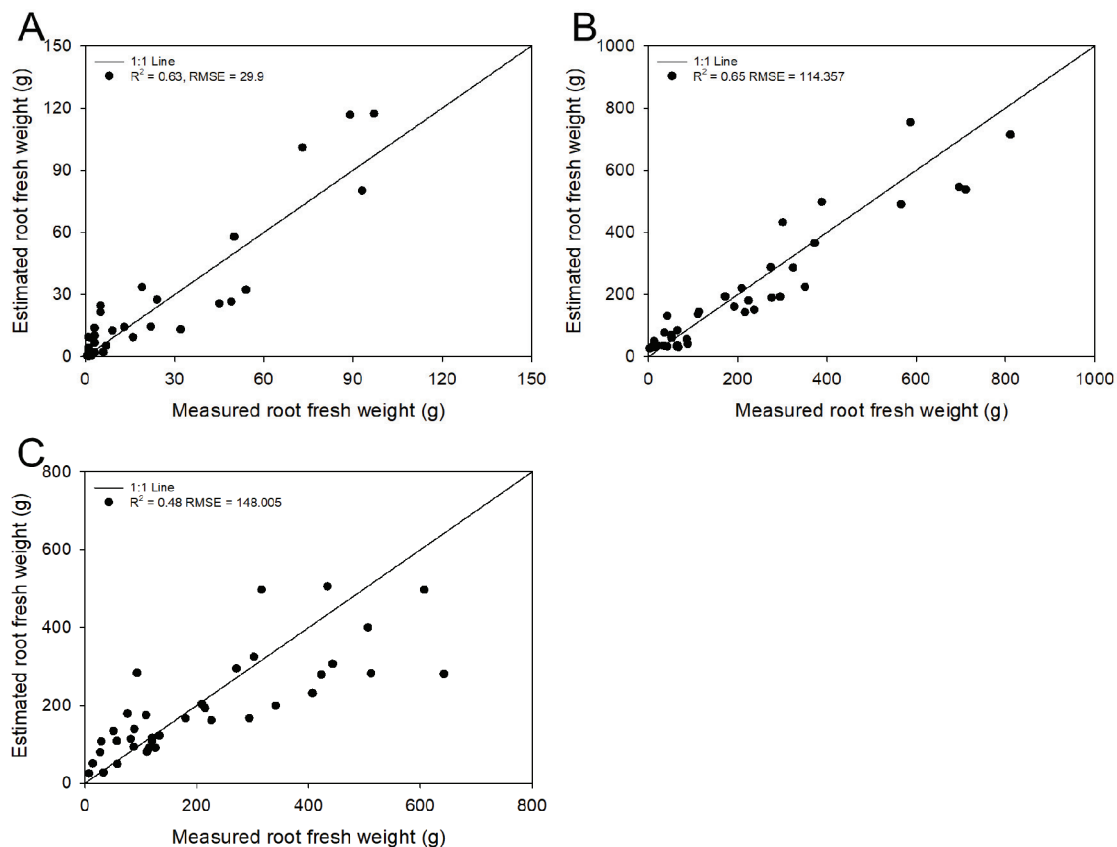


Fig. 3. Validation of the measured and estimated root fresh weight of red beet (A), sugar beet (B), and turnip (C) using regression model with highest R^2 value (Eqn. (14)).

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was supported by the “Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ014019022020)” of the Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

1. McCurdy MK (1988) Public trust protection for wetlands. *Environmental Law*, 19, 683.
2. Lee JE, Yun SI (2014) Effects of compost and gypsum on soil water movement and retention of a reclaimed tidal land. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 47, 340-344. <https://doi.org/10.7745/kjssf.2014.47.5.340>.
3. Munns R, Termaat A (1986) Whole-plant responses to salinity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 3, 143-160. <https://doi.org/10.1071/pp9860143>.
4. Zeng L, Shannon MC, Lesch SM (2001) Timing of salinity stress affects rice growth and yield components. *Agricultural Water Management*, 48, 191-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00146-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00146-3).
5. Shim SI, Lee SG, Kang BH (1998) Screening of saline tolerant plants and development of biological monitoring technique for saline stress. II. responses of emergence and early growth of several crop species to saline stress. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 17, 122-126.
6. Jo JY, Sung HY, Chun JH, Park JS, Park SU, Park YJ, Kim SJ (2018) Effects of electro-conductivity on growth of beet and turnip in the reclaimed land soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 37, 197-206. <https://doi.org/10.5338/kjea.2018.37.3.25>.
7. Greenway H, Muuns R (1980) Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 31, 149-190. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.001053>.
8. Lim WJ, Sonn YK, Yoon YM (2010) The selection of yield response model of sugar beet (*Beta vulgaris* var. Aaron) to nitrogen fertilizer and pig manure compost

- in reclaimed tidal land soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43, 174-179.
9. Park KW, Kang HM, Park YG (1996) Effects of nutrient concentrations for each growing stages on beet (*Beta vulgaris* L. cv. Detroit) growth. *Journal of Biological Production Facilities and Environment Control*, 5, 138-144.
 10. Kim KH, Lee SA, Yook HS (2007) Effects of gamma irradiation on physicochemical properties of red beet and stability of betalain in the red beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 36, 453-457.
<https://doi.org/10.3746/jkfn.2007.36.4.453>.
 11. Yi MR, Hee KC, Bu HJ (2017) Antioxidant and anti-inflammatory activity of extracts from red beet (*Beta vulgaris*) root. *Korean Journal of Food Preservation*, 24, 413-420.
<https://doi.org/10.11002/kjfp.2017.24.3.413>.
 12. Bor M, Özdemir F, Türkan I (2003) The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. *Plant Science*, 164, 77-84.
[https://doi.org/10.1016/s0168-9452\(02\)00338-2](https://doi.org/10.1016/s0168-9452(02)00338-2).
 13. Ghoulam C, Foursy A, Fares K (2002) Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 47, 39-50.
[https://doi.org/10.1016/s0098-8472\(01\)00109-5](https://doi.org/10.1016/s0098-8472(01)00109-5).
 14. Medina-Ruiz CA, Mercado-Luna IA, Soto-Zarazúa GM, Torres-Pacheco I, Rico-García E (2011) Mathematical modeling on tomato plants: a review. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 6745-6749.
<https://doi.org/10.5897/ajarx11.001>.
 15. Williams LE (1987) Growth of 'Thompson Seedless' grapevines. I. leaf area development and dry weight distribution. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 112, 325-330.
 16. Cho YY, Oh S, Oh MM, Son JE (2007) Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value. *Scientia Horticulturae*, 111, 330-334.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.028>.
 17. Montero FJ, de Juan JA, Cuesta A, Brasa A (2000) Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *HortScience*, 35, 696-698.
<https://doi.org/10.21273/hortsci.35.4.696>.
 18. Jung DH, Cho YY, Lee JG, Son JE (2016) Estimation of leaf area, leaf fresh weight, and leaf dry weight of Irwin mango grown in greenhouse using leaf length, leaf width, petiole length, and SPAD value. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 25, 146-152.
<https://doi.org/10.12791/ksbec.2016.25.3.146>.
 19. Kuyah S, Dietz J, Muthuri C, Jamnadass R, Mwangi P, Coe R, Neufeldt H (2012) Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. aboveground biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 216-224.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.011>.
 20. Wilson JB (1988) A review of evidence on the control of shoot:root ratio, in relation to models. *Annals of Botany*, 61, 433-449.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087575>.
 21. Mugasha WA, Eid T, Bollandas OM, Malimbwi RE, Chamshama SAO, Zahabu E, Katani JZ (2013) Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 310, 87-101.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.003>.
 22. Barnes A (1979) Vegetable plant part relationships. II. a quantitative hypothesis for shoot/storage root development. *Annals of Botany*, 43, 487-499.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085659>.
 23. Zianis D, Muukkonen P, Mäkipää R, Mencuccini M (2005) Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monograph*, 4, 1-63.
 24. Henry M, Picard N, Trotta C, Manlay RJ, Valentini R, Bernoux M, Saint-André L (2011) Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45, 477-569.
<https://doi.org/10.14214/sf.38>.
 25. El-Sherbeny MR, da Silva JAT (2013) Foliar treatment with proline and tyrosine affect the growth and yield of beetroot and some pigments in beetroot leaves. *Journal of Horticultural Research*, 21, 95-99.
<https://doi.org/10.2478/johr-2013-0027>.
 26. Giaquinta RT (1979) Sucrose translocation and storage in the sugar beet. *Plant Physiology*, 63, 828-832.
<https://doi.org/10.1104/pp.63.5.828>.
 27. Kandil AA, Badawi MA, El-Moursy SA, Abdou UMA (2004) Effect of planting dates, nitrogen levels and bio-fertilization treatments on 1: growth attributes of sugar beet (*Beta vulgaris*, L.). *Scientific Journal of King Faisal University (Basic and Applied Science)*, 5, 227-236.
 28. Ju HY, Chong C, Bible BB (1982) Influence of boron nutrition on glucosinolates and reducing sugars of

- turnip. Canadian Journal of Plant Science, 62, 1037-1042. <https://doi.org/10.4141/cjps82-153>.
29. El-Sherbeny SE, Hendawy SF, Youssef AA, Naguib NY, Hussein MS (2012) Response of turnip (*Brassica rapa*) plants to minerals or organic fertilizers treatments. Journal of Applied Sciences Research, 8, 628-634.
30. Jackson DS, Chittenden J (1981) Estimation of dry matter in *Pinus radiata* root systems I. individual trees. New Zealand Journal of Forestry Science, 11, 164-182.
31. Thornley JHM (1969) A model to describe the partitioning of photosynthate during vegetative plant growth. Annals of Botany, 33, 419-430. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084601>.
32. Thornley JHM (1972) A balanced quantitative model for root:shoot ratios in vegetative plant. Annals of Botany, 36, 431-441. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084602>.
33. Verwijst T, Nordh N (1992) Non-destructive estimation of biomass of *Salix dasyclados*. Bioresource Technology, 41, 59-63. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90099-j](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90099-j).
34. Antunes WC, Pompelli MF, Carretero DM, DaMatta FM (2008) Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). Annals of Applied Biology, 153, 33-40. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00235.x>.
35. Eitel JUH, Magney TS, Vierling LA, Brown TT, Huggins DR (2014) LiDAR based biomass and crop nitrogen estimates for rapid, non-destructive assessment of wheat nitrogen status. Field Crops Research, 159, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.01.008>.