

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA



**Estimación del Área Foliar del Tomate Chonto Roble *Solanum lycopersicum* L.
Usando un Modelo de Regresión. Cultivos del Municipio de San José de Miranda
(Santander, Colombia)**

Mayerly Morales Piñeros

Programa de Ingeniería Agronómica

18 de diciembre 2024

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA



**Estimación del Área Foliar del Tomate Chonto Roble *Solanum lycopersicum* L.
Usando un Modelo de Regresión. Cultivos del Municipio de San José de Miranda
(Santander, Colombia)**

Trabajo de grado bajo la modalidad de investigación presentado como requisito para
optar por el título de Ingeniero Agrónomo

Mayerly Morales Piñeros
1007206962

Tutor: Enrique Quevedo, Dr.

Programa de Ingeniería Agronómica
18 de diciembre 2024

Agradecimientos

Agradezco a Dios la oportunidad de formarme en y para el campo, para trabajar de cerca con la tierra y con los que poseen el don de hacerla producir el alimento que a todos nos mantiene. Ruego a él que pueda ejercer mi profesión respetando siempre el grado sagrado productor de vida.

Agradezco a la Universidad de Pamplona y al programa de Ingeniería agrónoma por su orientación y formación.

Agradezco al doctor Enrique Quevedo García por su disposición para ser tutor de este trabajo.

Dedicatoria

En memoria de mi padre, cuya sabiduría y amor siguen siendo una fuente constante de inspiración en mi vida, este éxito es el reflejo de Dios en mi vida quien es mi fortaleza.

A mi madre y mis hermanos,

Por el apoyo sin condición, consejos, cariño y amor.

A mi hija, fuente de motivación para ser su ejemplo en la vida.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	13
2	Problema.....	16
	2.1 Planteamiento del problema	16
3	Justificación.....	18
4	Objetivos	20
	4.1 Objetivo general	20
	4.2 Objetivos específicos.....	20
5	Marco teórico	21
	5.1 Antecedentes	21
	5.2 Marco contextual.....	24
	5.2.1 Descripción botánica	24
	5.2.3 Contexto geográfico del estudio	26
	5.3 Bases conceptuales	27
	5.3.1 Área foliar (AF).....	27
	5.3.2 Índice del área foliar (IAF).....	28
	5.3.3 Método de cálculo de ecuaciones alométricas.....	29
	5.3.4 Modelos de regresión lineal y curvilínea para la estimación del área foliar	30
	5.4 Marco legal.....	32
6	Metodología.....	34
	6.3 Tipo de investigación	34
	6.4 Diseño metodológico.....	34
	6.5 Sistemas de variables, método y herramientas de medición	35

6.6	Procesamiento de la información	38
6.7	Análisis estadístico	39
7	Resultados y discusión	40
7.3	Muestreo	40
7.4	Descripción de las 8 series de los modelos de regresión en las 400 hojas de tomate. 41	
7.2.1	Serie 1 ecuaciones de regresión obtenidas entre las medidas del método curvilíneo en la muestra de 50 hojas	41
7.2.2	Serie 2 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 100 hojas.....	42
7.2.3	Serie 3 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 150 hojas.....	43
7.2.4	serie 4 Ecuaciones de regresión obtenidas del método curvilíneo para estimar el área foliar (AF) de tomate de la variedad chonto roble usando como variable independiente largo máximo x ancho máximo.	44
7.2.5	Serie 5 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate chonto roble de la muestra de 250 hojas.....	45
7.2.6	Serie 6 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 300 hojas.....	46
7.2.7	Serie 7 Ecuaciones de regresión obtenidas del método curvilíneo para estimar el área foliar (AF) de tomate de la variedad chonto roble usando como variable independiente largo máximo x ancho máximo	47
7.2.8	Serie 8 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 400 hojas.....	48
7.5	Selección del modelo de regresión que más se ajustó a los datos	49
7.6	Estimación del área foliar con el modelo de regresión curvilíneo crecimiento.	51
7.5	Discusión de resultados	52

8	Conclusiones	57
9	Recomendaciones	58
10	Referencias	59
11.	Anexos	63

Lista de tablas

Tabla 1. Supuestos del modelo de regresión lineal	31
Tabla 2. Modelos de regresión para estimación curvilínea del área foliar	32
Tabla 3. Matriz de datos de variables morfofisiológicas.....	38
Tabla 4. Sistemas de variables de investigación.....	38
Tabla 5. Resultados los modelos de regresión curvilíneo empleando el mejor modelo se ajustó para la serie 1 de 50 hojas del cultivo de tomate <i>S. lycopersicum</i>	42
Tabla 6. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajusta para la serie 2 de 100 hojas del cultivo de tomate <i>S. lycopersicum</i>	43
Tabla 7. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajusta para la serie 3 de 150 hojas del cultivo de tomate chonto roble <i>S. lycopersicum</i>	44
Tabla 8. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo evidenciado de color amarillo el mejor modelo de regresión de la serie 4 de 200 hojas en el cultivo de tomate <i>S. lycopersicum</i>	45
Tabla 9. Aplicación de regresión en los modelos curvilíneo resaltando el mejor modelo para que fue logístico para la serie 5 de las 250 hojas de tomate <i>S. lycopersicum</i>	46
Tabla 10. Aplicación de regresión en los modelos curvilíneo resaltando el mejor modelo para que fue crecimiento para la serie 6 de las 300 hojas de tomate chonto roble <i>S. lycopersicum</i>	47
Tabla 11. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajusta para la serie 7 de 350 hojas del cultivo de tomate <i>S. lycopersicum</i>	48
Tabla 12. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajustó para la serie 8 de 400 hojas del cultivo de tomate chonto roble <i>S. lycopersicum</i>	48
Tabla 13. Modelos de regresión curvilínea con mejor R^2 en cada serie.....	50
Tabla 14. Modelo de regresión curvilíneo seleccionado	50
Tabla 15. Ecuación para estimar el área foliar	51

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de recolección de hojas para la estimación del AF.....	35
Figura 2. Proceso de medición de las variables.....	36

Anexos

Anexos 1. Matrices de datos básicos y de variables morfofisiológicas.....	63
Anexos 2. Matrices de datos básicos en el programa de Excel de las 400 hojas de tomate contó roble.	64

Resumen

El cálculo del área foliar contribuye a la gestión de predicciones de producción y para las propuestas de solución de problemas en los cultivos, siendo la base para estimar las necesidades de agua y nutrientes de los cultivos, la eficiencia bioenergética y los daños potenciales a los cultivos. El presente estudio tuvo como objetivo general estimar el área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum*. cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander) con un modelo de regresión apropiado. Para esto, se usa una metodología cuantitativa de diseño observacional en la que se hicieron ocho tomas de muestra de 50 hojas cada una y, con un método manual de dibujo de siluetas en papel azúcar, se llevan estas muestras al laboratorio para medir largo, ancho y peso. Estas y otras variables morfofisiológicas se exportadas de matrices del programa de Microsoft Excel al programa estadístico SPSS 23 para ser procesadas, descartando el modelo de regresión lineal por no cumplir con los supuestos y pasando a probar con modelos de regresión curvilíneo hasta obtener una ecuación desde el modelo de crecimiento que tuvo un coeficiente de determinación de 0,992 ($R^2 = 0,992$). Este grado de precisión del modelo permitirá a los cultivadores determinar el área foliar de las plantas de esta variedad de tomate por métodos no destructivos a partir de mediciones a partir de la silueta de la hoja, que derivará en datos para determinar el mejor manejo posible de la plantación garantizando calidad del fruto y producción suficiente.

Palabras clave. Área Foliar, medidas morfofisiológicas, modelo de regresión curvilíneo, tomate chonto *S. lycopersicum*.

Abstract

Leaf area calculation contributes to the management of production predictions and to the proposals for solving crop problems, being the basis for estimating the water and nutrient needs of crops, bioenergetic efficiency and potential damage to crops. The general objective of this study was to estimate the leaf area for the chonto roble tomato *S. lycopersicum*, grown on the Los Pitos farm (San José de Miranda, Santander) with an appropriate regression model. For this, a quantitative methodology of observational design is used in which eight samples of 50 leaves each were taken and, with a manual method of drawing silhouettes on sugar paper, these samples are taken to the laboratory to measure length, width and weight. These and other morphophysiological variables are exported from Microsoft Excel matrices to the SPSS 23 statistical program to be processed, discarding the linear regression model because it did not meet the assumptions and moving on to test curvilinear regression models until obtaining an equation from the growth model that had a determination coefficient of 0.992 ($R^2 = 0.992$). This degree of precision of the model will allow growers to determine the leaf area of the plants of this tomato variety by non-destructive methods from measurements based on the silhouette of the leaf, which will result in data to determine the best possible management of the plantation, guaranteeing fruit quality and sufficient production.

Keywords. Leaf Area, chonto tomato *S. lycopersicum*, curvilinear regression model, morphophysiological measurements.

1 Introducción

Las cifras a nivel mundial muestran que existe un problema de inseguridad alimentaria o carencia de alimento suficiente que generan problemas de hambre y desnutrición y, en consecuencia, individuos menos productivos y con más enfermedades, situación que hace cada vez más difícil alcanzar el desarrollo sostenible. Por esto, dentro de los Objetivos planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) está la meta de ‘Hambre cero’. En el caso colombiano, la prevalencia de inseguridad alimentaria alcanzó un 30,7 % en 2023 lo que afecta a más de 16 millones de personas. En el país existe una evidente dificultad para garantizar una alimentación adecuada a toda la población, de acuerdo con la FAO (2024) No solo se debe a la falta de alimentos, sino también a otros factores determinantes, como la carencia de empleo que afecta los ingresos familiares, problemas en las infraestructuras de transporte hacia los centros de acopio, y la baja tecnificación en los procesos agrícolas, entre otros. Esta problemática Una solución a estas problemáticas se puede dar a través de la promoción de cultivos de hortalizas y otros productos que si se tecnifican pueden garantizar una buena producción y trabajo para las familias de la zona de cultivo.

Por ejemplo, la producción y consumo mundial de las diferentes especies de tomate fresco está superando los 180 millones de toneladas por año, además de otras cantidades de esta hortaliza producida para otras presentaciones industriales como salsas o conservas. Colombia contribuye con más de 500 mil toneladas que se cultivan en más de 9.000 hectáreas en 21 departamentos del territorio nacional. Particularmente en el departamento de Santander (Colombia) la producción de tomate ocupa el tercer lugar dentro del ranking los cultivos transitorios con un 17,6 % (MinCit, 2024). Por esto, en este proyecto se eligió al tomate chonto roble *S. lycopersicum*. como la especie de estudio en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander), puesto que, es una de las zonas del departamento donde es relativamente nuevo este tipo de cultivos bajo invernadero y del que aún no se han hecho estudios que apoyen su manejo en actividades como la poda, el grado de exposición a la radiación solar, la humedad del

terreno, entre otras, que, hasta ahora, se hacen de manera intuitiva basados en la experiencia que trabajadores de la finca han adquirido al trabajar en otros cultivos de la región.

De tal manera que, para contribuir a la gestión de predicciones de producción y para las propuestas de solución de problemas en los cultivos, los estudios agronómicos usan el cálculo del Área Foliar (AF) como base para estimar las necesidades de agua y nutrientes de los cultivos, la eficiencia bioenergética y los daños potenciales a los cultivos. Fisiológicamente, existe una estrecha relación entre este índice y la interceptación de la radiación solar, que está asociada con los procesos de fotosíntesis y transpiración, ambos fuertemente vinculados con la acumulación de biomasa y la productividad. Por lo tanto, el AF es una variable utilizada para cuantificar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Mendoza et al., 2022).

Entonces, se realizó esta investigación ya que puede proporcionar un método y un modelo para que se haga dicho cálculo en la especie de tomate chonto roble en la zona, sirviendo de base para estimar las necesidades de agua y nutrientes de los cultivos, la eficiencia bioenergética y los daños potenciales a los cultivos. Por esto, el objetivo central que se propone es estimar el área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum*. cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander) con un modelo de regresión apropiado.

Por tanto, en este documento se encuentra dividido por capítulos, primero, la presentación del problema y su justificación. Luego, en segundo lugar, se establecen los objetivos tanto general como específico. Se continua con un tercer capítulo en el que se desarrolla un marco teórico que contiene los antecedentes de investigación, las bases conceptuales y los marcos contextual y normativo.

En el cuarto capítulo se describe la metodología que es cuantitativa observacional, fijando un sistema de variables donde se incluyen las de tipo morfofisiológicas como largo, ancho, peso y Área foliar. Se hacen 8 tomas de muestra, 50 hojas en cada una, de las que se dibuja su silueta en papel de azúcar y es sobre este material que se hacen las mediciones que se registran en matrices de Microsoft Excel para luego, ser procesadas por el programa estadístico de SPSS 23.

Los resultados registrados en el capítulo cuatro, muestran que el procesamiento de datos en el programa estadístico SPSS 23 arrojó que no se cumplieron los supuestos para optar por el modelo de regresión lineal y que, por ende, se debió acudir a los modelos de regresión curvilínea. Así, después de 8 series de análisis usando diferentes variables independientes con diversos tamaños de muestra (entre 50 y 400 hojas) y revisando los resultados del coeficiente de determinación (R^2) y el valor F de ANOVA se determinó que la mejor ecuación para la estimación del AF del tomate chonto roble *S. lycopersicum*. del cultivo analizado es la que proporcionó el modelo de crecimiento. El documento termina mostrando las conclusiones del estudio y las recomendaciones para futuras pruebas o aplicaciones.

2 Problema

2.1 Planteamiento del problema

La producción y consumo mundial de las diferentes especies de tomate fresco alcanzo para 2021 los 187 millones de toneladas (Statista, 2023), a lo que se le suman otras cantidades de esta hortaliza producida para otras presentaciones industriales como salsas o conservas. En Colombia se están produciendo más de 512 mil toneladas de tomate al año provenientes de más de 9.000 hectáreas de cultivo distribuidas en 21 departamentos del territorio nacional, siendo las variedades de chonto y milano las más comunes (ACIS, 2023), pero la especie de tomate de mayor producción para consumo directo es el chonto. A pesar de esto, el cultivo de esta especie a nivel nacional se enfrenta a diversos problemas de origen biológico, ambiental y económico. Esto es, el alto costo de producción se asocia a los hábitos indeterminados de crecimiento de esta planta y las labores de “tutorado, amarres, poda, manejo agronómico y aplicación de pesticidas, principalmente” (Burbano y Vallejo, 2017).

Particularmente en el departamento de Santander (Colombia) la producción de tomate ocupa el tercer lugar dentro del ranking los cultivos transitorios con un 17,6 % (MinCit, 2024). Pues las condiciones climáticas, de terreno y de mano de obra con que cuentan varios municipios del departamento de Santander favorecen los cultivos de tomate y de otras hortalizas. Esto hace que, en municipio como San José de Miranda se esté dedicando terrenos e inversión al cultivo de tomate chonto y se necesiten estudios puntuales que ilustren a inversores y campesinos del potencial de producción que se puede tener.

Con el fin de mejorar estas condiciones, los estudios agronómicos usan el cálculo del Área Foliar (AF) para contribuir a la gestión de predicciones de producción y para las propuestas de solución de problemas en los cultivos. Además, es la base para estimar las necesidades de agua y nutrientes de los cultivos, la eficiencia bioenergética y los daños potenciales a los cultivos. Existe una estrecha relación entre este índice y la interceptación de la radiación solar,

que está asociada con los procesos de fotosíntesis y transpiración, ambos fuertemente vinculados con la acumulación de biomasa y la productividad. Por lo tanto, el AF es una variable utilizada para cuantificar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Mendoza et al., 2022).

Así surge como pregunta de investigación ¿Cómo estimar el área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum* cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander) con un modelo de regresión apropiado?

3 Justificación

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) planteó como segundo objetivo la meta de ‘Hambre cero’, basados en los datos que muestran que existe un problema mundial de inseguridad alimentaria o carencia de alimento suficiente que generan problemas de hambre y desnutrición y, en consecuencia, individuos menos productivos y con más enfermedades. Cadena de efectos que hacen cada vez más difícil alcanzar el desarrollo sostenible.

Por su parte, un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024) afirma que en Colombia “para el periodo 2021-2023, la prevalencia de inseguridad alimentaria moderada o grave fue de 30,7 %, afectando a 16,3 millones de personas” De acuerdo con la FAO (2024), existe una clara indicación de que existe un problema sistémico que impide que todos los ciudadanos tengan acceso a una alimentación suficiente y adecuada. La carencia de empleo adecuado limita los ingresos familiares, lo que a su vez limita la capacidad de las familias para comprar alimentos. Esto sugiere una estresante conexión entre el bienestar económico y la seguridad alimentaria. La infraestructura de transporte inadecuada dificulta el movimiento de alimentos desde los productores hasta los consumidores a través de la infraestructura de transporte inadecuada. Esto podría ocasionar pérdidas en la cadena de suministro y afectar la disponibilidad de los alimentos. Los elevados costos de transporte pueden incrementar el precio final de los alimentos, lo que afecta la situación para las familias con recursos limitados. La carencia de tecnologías avanzadas en los procesos de cultivo puede generar ineficiencias en la producción agrícola, lo que puede obstaculizar la oferta de alimentos. Esto puede deberse a una carencia de inversión en el sector agrícola o a la falta de capacitación para los agricultores. La cuestión de la alimentación no puede ser percibida de manera aislada; todos estos factores están interrelacionados y afectan la capacidad del país para garantizar la seguridad alimentaria. Lo anterior justifica el presente estudio en término de su impacto social y económico, puesto que, apoya los procesos productivos que significan ingresos para familias vinculadas y la garantía de alimentación a la población en general.

Además, como es prioridad para los centros de educación superior en los programas relacionados a alimentación y agricultura promover investigaciones que procuren maximizar los recursos y fortalecer otros procesos sociales como la generación de empleo y la producción agrícola zonal, esta investigación hace parte de las propuestas investigativas que la Universidad de Pamplona promueve y dirige.

En este estudio se elige al tomate chonto roble *S. lycopersicum*. como la especie de estudio en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander), en una de las zonas del departamento donde es relativamente nuevo este tipo de cultivos bajo invernadero y del que aún no se han hecho estudios que apoyen su manejo en actividades como la poda, el grado de exposición a la radiación solar, la humedad del terreno, entre otras, que, hasta ahora, se hacen de manera intuitiva basados en la experiencia que trabajadores de la finca han adquirido al trabajar en otros cultivos de la región.

Entonces, si los estudios agronómicos usan el cálculo del Área Foliar (AF) para contribuir a la gestión de predicciones de producción y para las propuestas de solución de problemas en los cultivos, realizar esta investigación puede proporcionar un método y un modelo para que se haga dicho cálculo en la especie de tomate chonto roble en la zona, sirviendo de base para estimar las necesidades de agua y nutrientes de los cultivos, la eficiencia bioenergética y los daños potenciales a los cultivos. De tal manera que, se aprovecha la relación entre el AF y la interceptación de la radiación solar, asociada con los procesos de fotosíntesis y transpiración, con la acumulación de biomasa y la productividad para cuantificar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Mendoza et al., 2022), un aporte en el campo de la tecnificación de los procesos agrícolas.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

- ❖ Estimar el área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum*. cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander) con un modelo de regresión apropiado.

4.2 Objetivos específicos

- ❖ Establecer el modelo de regresión con el mejor coeficiente de determinación (R^2) para la estimación del área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum*. cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander).
- ❖ Analizar estadísticamente a través del modelo de regresión elegido la estimación del área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum*. cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander).

5 Marco teórico

5.1 Antecedentes

La búsqueda de antecedentes en artículos o informes de investigación en inglés y español se basó en dos términos clave; 'área foliar' y 'área foliar tomate', publicados en los últimos 10 años. La selección preliminar se hizo por título y lectura de resumen y, así se eligieron 8 investigaciones, 5 sobre estudios de AF en diferentes especies a la del tomate y 3 para esta (2 estudios fueron específicos para *S. lycopersicum*). Los estudios registrados sirven de ilustración para los métodos aplicados en el cálculo de AF, tanto en su procedimiento como en su eficiencia.

En la investigación realizada en la India por Khan et al. (2016) en plantas de huerto, llegaron a la conclusión de que la estimación del área foliar es un rasgo biométrico importante para evaluar el desarrollo de las hojas y el análisis del crecimiento de las plantas en estudios de campo de plantas hortícolas y otras especies de cultivos, siendo más útiles, confiables, rápidos y económicos los métodos no destructivos de estimación del área foliar, como las ecuaciones de regresión, para lo cual se miden la longitud (L), el ancho (W) y/o la masa seca (M) de una muestra de hojas y luego, basados en los diversos coeficientes de regresión o factores foliares posibles, estiman el área de las muestras de hojas posteriores. Para esto, se valen de programas informáticos como Excel, SAS y SPSS. Además, en la revisión realizada analizaron varios modelos de estimación del área foliar de cultivos hortícolas de la literatura disponible y los sintetizaron en forma de tabla para el uso de los investigadores. El artículo también muestra algunas ventajas y desventajas de los modelos de estimación del área foliar utilizados para analizar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

De manera semejante, Erlacher et al. (2016) en su estudio sobre el área foliar en cultivos de Yacón realizados en Brasil, realizado como parte del proceso de tecnificación de estos. Se plantearon como objetivo establecer un modelo de estimación del área foliar de estas plantas, utilizando mediciones no destructivas de la longitud (L) y/o el ancho (W) de las hojas. Así que,

se seleccionaron al azar 74 plantas representativas de yacón en un campo experimental durante el pleno crecimiento vegetativo. De esas plantas se tomaron hojas de diversos tamaños para prepararlas. El modelo logarítmico se ajustó mejor a este propósito, donde el resultado de multiplicar el largo por el ancho se utilizó como variable independiente. El área de la hoja de yacón se puede determinar con alta precisión y precisión por $LA_{LW} (-27,7418 + (3,9812LW/\ln LW))$, sin tener en cuenta el tamaño de la hoja.

Por su parte, en el estudio de Cirillo et al. (2017) realizado en albaricoqueros de Italia se encontraron relaciones muy estrechas entre los valores de área foliar observados y predichos por el modelo que tiene $L \times W$ como variable independiente. El modelo que requirió dos medidas por hoja [$AF = 1,193 + 0,668 (L \times W)$] no solo proporciona estimaciones más precisas que los modelos unidimensionales, sino que también fue independiente del cultivar. Los resultados de este estudio sugieren que el modelo $L \times W$ puede adoptarse con éxito en la investigación sobre el albaricoquero, ya que permite estimar con precisión, de manera no destructiva y en grandes cantidades la AF individual de varios cultivares de albaricoquero sin el uso de dispositivos costosos como planímetros, analizadores de dosel vegetal y escáneres manuales.

En el ámbito nacional, el estudio de Jaime et al. (2023) para desarrollar modelos no destructivos para estimar el AF individual, mediante parámetros alométricos en hojas de gulupa, luego de una prueba en 100 hojas de este cultivo en Arcabuco (Boyacá), se compararon de acuerdo con el coeficiente de determinación R^2 los resultados en dos métodos estándar: el medidor portátil láser CI-202 y el software Easy Leaf Area (ELA). Las medidas base para esto fueron la longitud del lóbulo central (L), el lóbulo derecho (LD) e izquierdo (LI), el ancho base en los lóbulos (a) y el ancho entre las puntas terminales de los lóbulos (b) y se calculó la longitud total (L_t), como la suma de $L+LD+LI$. De los dos métodos, resultó más confiable el ELA pues el R^2 de 0,9336 y 0,9612 permite realizar la mejor predicción del AF en este caso.

Y, más recientemente, también en Colombia, el estudio realizado por Rincón y Mora (2024) que tuvo como objetivo estimar el AF de las especies de mora uva y curuba utilizando

métodos de regresión para lo que, primero, establecieron el mejor tamaño de muestra para estimar el área foliar por el método indirecto del uso de regresión lineal bivariada y curvilínea y, luego, identificaron las variables de regresión resultantes. Así que, una vez validados con un coeficiente de determinación ajustado por encima de 0,9 para diferentes tamaños de muestra equivalentes a más de 150 piezas, se aplicaron los modelos de regresión curvilínea. Las ecuaciones encontradas permitirán determinar con alto nivel de precisión el AF de las especies estudiadas convirtiéndose en una herramienta técnica para el manejo de estos cultivos desde un modelo matemático superando los métodos automatizados.

Ahora, de los estudios realizados específicamente con el AF de cultivos de tomate se seleccionaron 3. Empezando por el estudio de Küçükönder et al. (2015) realizado en Turquía tuvo como objetivo desarrollar el mejor modelo de estimación del área foliar para plantas de tomate (*Typhoon F1*) cultivadas en condiciones de invernadero de plástico. Para esto, los investigadores hicieron prueba con el modelo de red neuronal artificial (ANN) y las técnicas de análisis de regresión para la estimación del área foliar mediante la medida del largo y ancho de la hoja (medición lineal) de una muestra de 420 hojas. Se tomaron en cuenta los criterios de selección de valores bajos para el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE), y valores altos para el coeficiente de determinación (R^2), y se determinaron los mejores modelos de estimación. En la comparación realizada según estos criterios, se concluyó que los valores de error del modelo ANN [$R^2 = 0,96$, RMSE = 3,30, MAE = 1,94 y MAPE = 0,05] fueron menores que los del modelo de regresión [$R^2 = 0,92$, RMSE = 4,71, MAE = 3,31 y MAPE = 0,08], y que el método ANN proporcionó un mejor ajuste a los valores reales; por lo tanto, el modelo ANN puede utilizarse como un método alternativo en la estimación del área foliar.

Particularmente, de trabajos realizados para cálculo del AF en la especie de tomate específica que se estudia para el presente informe *S. lycopersicum*, se encontraron dos estudios. El primero de estos se realizó en México por Bautista (2016) en tomates cultivados en invernadero comparando un método destructivo con otro no destructivo (con equipo de interceptación de radiación solar). Al final los valores arrojados por ambos métodos son similares.

Las variables tenidas en cuenta fueron el AF e IAF tomando medidas directas e indirectas, según el método, al peso seco del tallo, hoja y fruto, la longitud y diámetro del tallo, peso fresco y diámetro del fruto, número de estos, entre otros.

El otro estudio específico de la misma especie de estudio del presente informe *S. lycopersicum*. se hizo más recientemente también en México por Mendoza et al. (2022). El objetivo central fue el de estimar el índice de área foliar (IAF) del tomate comparando también dos métodos, uno destructivo y otro por interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (no destructivo) y su consecuente relación con el rendimiento y calidad de los frutos. El experimento se llevó a cabo en un invernadero con tezontle (escoria volcánica roja) como sustrato y un sistema de riego por goteo para el que se hicieron tres tratamientos: T1, T2 y T3, con uno, dos y tres tallos por planta, respectivamente. El IAF se midió con un ceptómetro que estima la radiación interceptada por encima y por debajo del dosel. Estos índices fueron 3.69, 5.27 y 6.16 para T1, T2 y T3, respectivamente. Los modelos de correlación individuales se ajustaron linealmente entre los dos métodos. Los valores de R^2 fueron 0,98, 0,99 y 0,99 con rendimientos de 20, 18 y 17 kg m² para T1, T2 y T3, respectivamente. Además, T1 produjo una mejor calidad del tamaño de la fruta con aproximadamente 69, 23 y 8% clasificados como primera, segunda y tercera clase, respectivamente. Solo el 1% fue clasificado como fruta pequeña. El aumento del número de tallos por planta aumentó el IAF y el número de frutos, pero disminuyó el tamaño de los frutos

5.2 Marco contextual

5.2.1 Descripción botánica

Plantas herbáceas anuales o perennes, autógamas, de porte erecto y hasta más de 1,5 m de altura, vellosas e inermes. Hojas compuestas imparipinnadas, de 15-45 cm de longitud. Foliolos 5-9 por hoja, ovados u oblongos, de 5-7 cm de longitud, con el borde dentado o lobulado, el ápice agudo y la base oblicua. Pseudoestípulas presentes. Flores con pedicelos de 9-12 mm en cimas escopioideas o racemiformes simples o bífidas. Brácteas ausentes. Cáliz

profundamente 5-lobulado. Corola amarilla y de más de 2,5 cm de diámetro. Baya roja, rosada o amarillenta, oblonga, globosa y deprimida o piriforme, de más de 2 cm de diámetro, lampiña y plurilocular. Semillas numerosas, aplanadas y amarillentas. $2n = 24$. Se cultiva por sus frutos que se comen como verdura y en ensalada se utilizan para preparar condimentos, salsas y zumos. Multiplica por semilla. Regiones templadas y tropicales (González, 2018).

5.2.2 Tomate chonto *S. lycopersicum*

La especie a la que se dedica el presente estudio conocida como *S. lycopersicum* es conocida con los nombres de tomate chonto o jitomate silvestre. La producción de las diversas variedades de esta especie se concentra en países como Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y México, siendo este último el territorio reconocido como el que ‘domesticó’ esta especie salvaje convirtiéndola en especie de cultivo (Bautista, 2016).

Lo más común es que esta hortaliza se cultive en invernadero, pues permite el control de variables atmosféricas y de la densidad de siembra que suele ser baja (2 o 3 plantas por metro cuadrado) para optimizar la interceptación de radiación y, por ende, el tamaño de los frutos (Jaramillo et al., 2006). Los brotes laterales se podan con frecuencia, dejando un solo tallo que alcanza más de siete metros de largo, así se logran 15 o más racimos por planta en una sola cosecha. La eliminación de los brotes laterales reduce la competencia interna por agua, nutrientes y asimilados, y el método del enrejado de hilos sostiene a la planta y mejora la iluminación del dosel (Mendoza et al., 2022). Este sistema de producción se está probando en Colombia y está contribuyendo al aumento del área cultivada, la productividad, la rentabilidad y la calidad.

Como se anotó en la descripción de la problemática, en Colombia se están produciendo más de 500.000 toneladas de tomate al año provenientes de más de 9.000 hectáreas de cultivo distribuidas en 21 departamentos del territorio nacional, siendo las variedades de chonto y milano las más comunes. (ACIS, 2023).

5.2.3 Contexto geográfico del estudio

El departamento del Santander (Colombia) se encuentra en la zona nororiental del país. Se divide en 7 provincias en las que se ubican sus 87 municipios. En su terreno se pueden encontrar zonas con alturas variadas gracias a su localización sobre la Cordillera Oriental, rama de la Cordillera de los Andes. Esto incide en la variedad de climas que se rigen por los pisos térmicos resultantes del relieve (altitud media 1230 msnm). Los ríos que irrigan sus tierras son principalmente afluentes del río Magdalena, pero también tienen zonas donde abundan las ciénagas. Las anteriores condiciones hacen que se favorezca su economía agrícola, ganadera y piscícola, aunque existe también la extracción de minerales y empresas del sector industrial y de servicios. Entre los productos de producción agrícola en el departamento existen algunos cultivos permanentes como la caña, la palma de aceite, la piña y el café, entre otros y, de cultivos transitorios como la yuca, la cebolla, la papa y el tomate (MinCit, 2024).

Con relación al cultivo del tomate, el último informe del MinCit (septiembre 2024) afirma que el 17,6 % de los cultivos transitorios del departamento de Santander son de esta hortaliza, lo que implica de cerca de 1200 Unidades Productiva Agrícolas (UPA) y 1500 productores, donde el 30 % son mujeres, el 74 % se consideran pobres (estrato socioeconómico bajo) y hay una tasa de analfabetismo del 6 % (Gobernación de Santander, 2020).

Actualmente, el tomate producido en el departamento es para consumo interno, no se exporta ni se procesa industrialmente. Los productores lo venden a intermediarios que lo comercializan en plazas de mercado. Aunque se está trabajando por mejorar las condiciones de estos cultivos y quienes trabajan en ellos. La Gobernación de Santander (2020) en su plan departamental 2020-2023 anotó el rendimiento promedio de las UPA en el Departamento fue de 21 t/ha-1 frente al 13,8 t/ha-1 que registró la nación, lo que quiere decir que tiene una brecha positiva con el promedio nacional de 34,4 %, sin embargo, la asociatividad es baja con un 20% dato arrojado de la tabla 14, por lo que es una oportunidad para trabajar en este aspecto aprovechando que es un producto de muy alto consumo.

Particularmente, el municipio de San José de Miranda, donde se desarrolló este estudio, está ubicado en la provincia de García Rovira (suroriente del departamento) con una superficie total de 85 Km² y una latitud media de 1950 msnm (punto más bajo 900 msnm y más alto 3200 msnm) lo que hace que se tengan las condiciones propicias para el cultivo del tomate como hortaliza.

La población aproximada es de 4600 habitantes repartidos en la zona urbana (18 %) y rural (82 %) que, a su vez, la conforman 16 veredas. Además de ser una zona dedicada a la agricultura existen algunas pequeñas industrias dedicadas a la explotación del barro con lo que fabrican ladrillos y tejas (Hernández y Flórez, 2008).

5.3 Bases conceptuales

Para el desarrollo de la investigación que se documenta en este informe fue necesario tener en cuenta como base los conceptos de área foliar, los métodos de cálculo de esta y, los conocimientos sobre la especie de estudio, es decir, el tomate chonto roble *S. lycopersicum* vc Roble.

5.3.1 Área foliar (AF)

De acuerdo con Mejía (2022) “el área foliar se define como la capacidad de la cubierta vegetal para interceptar la radiación fotosintéticamente activa, fuente primaria de energía utilizada por las plantas, para la fabricación de tejidos y la elaboración de compuestos alimenticios” (p. 20). Dicho de otra manera, en el estudio de las plantas se reconoce a la hoja como el órgano que ejecuta las funciones fotosintéticas que implica el flujo de gases y transferencias de radiación solar para que la planta funcione fisiológica y morfológicamente, por tanto, determinar el área foliar tiene relación directa con el análisis de cómo están muchos de los “procesos agronómicos, biológicos, ambientales y fisiológicos, que incluyen el análisis

de crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración, la interceptación de luz, la asignación de biomasa y el balance de energía”.

Medir el AF junto con otros datos de variación de los cultivos sirve para evaluar de manera técnica algunas prácticas agrícolas “como podas, fertilización, irrigación y aplicación de productos químicos” (Montoya et al., 2017) y modelar los mecanismos de hidratación y exposición a la radiación.

a medición del área foliar es un parámetro importante para comprender el crecimiento y la fisiología de una planta. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo desarrollar el mejor modelo de estimación del área foliar para plantas de tomate cultivadas en condiciones de invernadero plástico. (KÜÇÜKÖNDER et al., 2016)

Para determinar el AF existen métodos destructivos, no destructivos, directos e indirectos. Los métodos destructivos o no destructivos están determinados por el tipo de intervención que se hace a la planta; si la medición se hace sin extraer o eliminar alguna estructura de la planta será no destructivo y si, por el contrario, se debe extraer una parte de la planta será un método destructivo. La decisión de usar un método u otro dependerá de varios factores como el tamaño del cultivo o del grado de precisión de los resultados (Mejía, 2022).

En cualquier caso, para la toma de datos se pueden usar procedimientos como el uso de papel milimetradas, el análisis fotográfico digital el escaneo de imágenes o mecanismos gravimétrico. Cualquiera de estos procedimientos aplicados con el rigor correspondiente es igual de efectivos, dependerá entonces de los aparatos electrónicos a los que tenga alcance el investigador o agricultor (Citadinni y Peri, 2006).

5.3.2 Índice del área foliar (IAF)

En el caso que ocupa esta investigación, no se calcula este índice, pero pareció apropiado incluirlo en el marco teórico para hacer la diferenciación pertinente. El índice de área foliar (IAF) es una variable importante para estudiar el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Además, es la base para estimar los requerimientos de agua y nutrientes de los cultivos, la eficiencia bioenergética y el daño potencial a los cultivos. Existe una estrecha relación entre el IAF y la intercepción de la radiación solar, la cual está asociada a los procesos de fotosíntesis y transpiración, ambos fuertemente ligados a la acumulación de biomasa y la productividad. Por lo tanto, el IAF es una variable utilizada para cuantificar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. La región del espectro electromagnético de mayor interés en la agricultura es la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la cual tiene longitudes de onda entre 400-700 nm. Es importante conocer la distribución espacial y temporal de la intercepción de RFA por parte de los cultivos, ya que es la base para el análisis de los procesos biológicos (Mendoza et al., 2022).

5.3.3 Método de cálculo de ecuaciones alométricas

Desde la alometría se postula que las tasas relativas entre dos magnitudes fisiológicas o morfológicas son proporcionales. En consecuencia, es un modelo que depende de la comparación de las variables y del análisis de lo que sucede en la realidad de los procesos. Así, “el modelo sugiere que el organismo no es una suma de partes, sino que, en él, cada parte está estrechamente vinculada con todas las demás y que, entre ellas hay una armonía esencial” (Sánchez y Gutiérrez, 2020.) y, por tanto, un cambio en una de estas partes desencadena cambios en las demás. Entonces, en el cálculo del AF desde ecuaciones alométricas el método consiste en aproximar en alto grado el área de la hoja, mediante regresiones que pueden ser relaciones lineales, logarítmicas, exponenciales o de otro tipo, donde la medición de un atributo ya sea el largo de la lámina foliar, el ancho de la hoja o los dos combinados, representen un factor altamente dependiente, que, al ser multiplicado por un coeficiente, arroje como resultado un valor muy cercano al real (Mejía, 2022,).

Usar medidas lineales del largo o ancho de la hoja como medida para estimar el AF ha sido determinada como altamente confiable, sobre todo en especies forestales, pero, es más preciso calcular el producto de estas medidas en especies como el mijo, el tomate, el durazno o el ciruelo (Cabezas et al., 2009; Leite et al., 2019; Astegiano et al., 2001; Casierra et al., 2017).

No obstante, generalizar una ecuación para todas las especies no es conveniente, así que, es más confiable realizar pruebas estadísticas y de campo en cada caso y validar su aplicación y repetición con el tiempo (Mejía, 2022).

El procedimiento habitual de este método implica medir la longitud (L), el ancho (W) y/o la masa seca (M) de una muestra de hojas y luego calcular los diversos coeficientes de regresión o factores foliares posibles para estimar el área de las muestras de hojas posteriores. En este proceso se pueden utilizar programas informáticos como Excel, SAS y SPSS (Khan et al., 2016).

5.3.4 Modelos de regresión lineal y curvilínea para la estimación del área foliar

Aplicar el modelo de regresión lineal en la estimación del AF dependerá del cumplimiento de la totalidad los supuestos de linealidad, independencia, normalidad, homocedasticidad y no colinealidad (Tabla 1); si esto no sucediera, es decir, dejara de cumplir uno o más supuestos, se recurrirá a la elección de un modelo de regresión curvilínea.

Tabla 1. Supuestos del modelo de regresión lineal

Supuesto del modelo	Concepto
Linealidad	La relación entre el área foliar como variable dependiente y el largo por el ancho de la hoja es claramente lineal.
Independencia	Como el estadístico de DW está entre 1,5 y 2,5. No podemos rechazar la hipótesis de que los residuos son independientes, es decir no están auto correlacionados.
Normalidad	No existe suficiente evidencia muestral para rechazar que los residuos se encuentran distribuidos como la normal (SW = 0; 953; valor-p = 0; 205).
Homocedasticidad	Comúnmente este supuesto se verifica mediante una gráfica. Se deben graficar los valores pronosticados (ZPRED) con los valores residuales (ZRESI). Si no se detectan tendencias, entonces se cumple el supuesto de homocedasticidad.
No-colinealidad	Como los FVI son menores que 10, entonces se cumple el supuesto de no-colinealidad. Si se detecta la presencia de colinealidad hay que i) aumentar el tamaño de la muestra; ii) crear indicadores múltiples combinando variables; iii) excluir variables redundantes, quedándonos con las que consideremos más importantes.

La variable dependiente no se transformó y se seleccionó el curvilíneo debido al no cumplimiento de los anteriores supuestos. El análisis comparativo de modelos de regresión de estimación curvilínea para el AF permite establecer, en cada caso de estudio, cuál modelo ofrece una mejor medida de ajuste de regresión R^2 , es decir, el porcentaje de varianza en el campo de destino. Así, el valor más cercano a 0,992, indico un margen de error menor y, por tanto, un modelo de mayor precisión. También se evalúa nivel de significancia del 5%, distribución F, significación del modelo en su análisis de varianza (ANOVA) $P < 0,05$ la significancia de los parámetros de regresión. Entonces, se podrán escoger los modelos curvilíneos con el mayor valor de F, y el R^2 por encima del 80 % o 0, 80.

Dicho análisis comparativo se puede establecer entre los modelos logarítmico, inverso, cuadrático, cúbico, compuesto, potencia, curva-S, crecimiento, exponencial y logístico, entre otros (Tabla 2).

Tabla 2. Modelos de regresión para estimación curvilínea del área foliar

Modelo	Ecuación
Logarítmico	$Y = b_0 + (b_1 * \ln(t))$
Inverso	$Y = b_0 + (b_1 / t).$
Cuadrático	$Y = b_0 + (b_1 * t) + (b_2 * t^{**2})$
Cúbico	$Y = b_0 + (b_1 * t) + (b_2 * t^{**2}) + (b_3 * t^{**3})$
Compuesto	$Y = b_0 * (b_1^{**t})$ o $\ln(Y) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * t)$
Potencia	$Y = b_0 * (t^{**b_1})$ ó $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * \ln(t))$
Curva-S	$Y = e^{**}(b_0 + (b_1/t))$ o $\ln(Y) = b_0 + (b_1/t)$
Crecimiento	$Y = e^{**}(b_0 + (b_1 * t))$ ó $\ln(Y) = b_0 + (b_1 * t)$
Exponencial	$Y = b_0 * (e^{**}(b_1 * t))$ ó $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * t)$
Logístico	$Y = 1 / (1/u + (b_0 * (b_1^{**t})))$ o $\ln(1/y-1/u) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * t)$

Fuente: (IBM, 2024)

5.4 Marco legal

Esta investigación se ampara bajo la normatividad colombiana que se rige en principios como un Estado social de Derecho. Partiendo de la Ley 101 (1993) promulgada, entre otras razones, para la protección del desarrollo de las actividades agropecuarias y la promoción del “ingreso y calidad de vida d ellos productores rurales”, esta ley propone que se eleve la eficiencia y competitividad de los productos agrícolas, a la vez que, se favorezca el desarrollo tecnológica del agro, por tanto, este tipo de estudios puede contribuir a que los pequeños productores cuenten con la asistencia técnica necesaria en sus cultivos.

También se tiene en cuenta en este marco normativo, el Plan Nacional de Desarrollo vigente (PND), es decir, PND 2022-2026 de la Dirección Nacional de Planeación (DNP, 2023) que afirma que se deben propiciar los modelos de producción agropecuaria partiendo de

procesos de investigación donde se tengan en cuenta “las necesidades de los territorios, sus poblaciones, sus necesidades logísticas y sus cadenas productivas priorizadas” (p. 133), esto en línea con el derecho de alimentarse que tiene todo ciudadano y ser humano en general. Obviamente, estas disposiciones están ligadas al ODS número 2 cuyo propósito es lograr la seguridad alimentaria de la población (ONU, 2015).

Por otro lado, se incluyen las disposiciones del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (Ley 1876, 2017) que define la innovación agropecuaria y la innovación abierta o colaborativa como procesos importantes para el avance del campo colombiano y del mejoramiento de calidad de vida de los campesinos y productores agrícolas. Procesos para los cuáles la investigación técnica puede dar elementos que contribuyan a esta.

6 Metodología

6.3 Tipo de investigación

El presente estudio sigue la tipología cuantitativa, por lo que, el problema de investigación es delimitado y concreto, se consideran los antecedentes, se construye un marco teórico o bases conceptuales para fundamentarlo y se recolectan datos tomados en la medición de variables fijadas que, a su vez, exigen de un análisis estadístico para que se lleguen a explicaciones objetivas (Hernández y Mendoza, 2023).

Los métodos cuantitativos tienen su origen en el pensamiento positivista, un paradigma hipotético deductivo que busca que el “conocimiento sea sistemático, comprobable, comparable, medible y replicable” (Martínez, 2013, p. 3). Esto lleva a que en las técnicas e instrumentos deban ser claros para que, se comprenda tanto el proceso como los hallazgos y puedan servir de referentes o modelos.

6.4 Diseño metodológico

El diseño metodológico es de tipo observacional que se da de acuerdo con el grado de intervención del investigador en el fenómeno estudiado. Entonces, en los “estudios observacionales se sustenta en el uso de técnicas que permiten al investigador adquirir información por medio de la observación directa y el registro de fenómenos, pero sin ejercer ninguna intervención (dejando libres a los observados)” (Müggenburg y Pérez, 2007.)

Al respecto, Chacma y Lara (2021) ratifican que ante “la existencia de cualquier grado de manipulación de cualquiera de las variables a medir, existen dos posibilidades: ser un estudio observacional si es que en ningún momento se realizó manipulación alguna de las variables, o ser experimental si se llegó a producir alguna manipulación.

Por tanto, dado que en la presente investigación el proceso implicó la obtención de información sin la manipulación o intervención directa de la investigadora sobre los resultados queda sustentado que fue una investigación cuantitativa observacional.

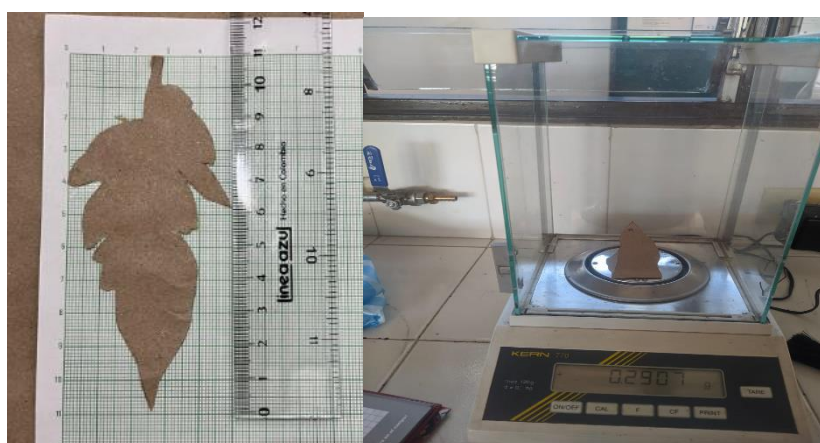
6.5 Sistemas de variables, método y herramientas de medición

Aplicando un método destructivo para la recolección de la muestra de hojas para estimación del área foliar en la especie de tomate chonto roble *S. lycopersicum*, se hicieron 8 series de tomas aleatorias de 50 piezas cada una, en el mismo cultivo de invernadero o de agricultura protegida (finca Los Pitos, vereda La Carbonera, municipio San José de Miranda, provincia García Rovira, departamento de Santander). Lo que significó realizar una recolección cada dos semanas durante 4 meses en el periodo productivo de las plantas y, que sumó un total de 400 piezas de hojas para el análisis, a cada una de las cuales se les asignó un código numérico (Figura 1). (Rincón y Mora, 2024).



Figura 1. Proceso de recolección de hojas para la estimación del AF

La toma de muestras (hojas adultas) se realizó de tal manera que el tamaño de la hoja sea el más parecido entre el órgano en los cultivos en plena producción bajo invernadero, en el tercio medio de las plantas y en ramas tomaron hojas en plena producción. Debido al rápido proceso de marchitamiento del material vegetal extraído y previniendo la reducción en tamaño y peso que esto ocasiona, se opta por aplicar una técnica con las siluetas de las piezas de la muestra.



	A	B	C	D
1	No Hojas	Largo (cm)	Ancho(cm)	Peso (gr)
2	1	10,2	4,5	0,1975
3	2	15,5	4,3	0,3311
4	3	13,2	5	0,3165
5	4	13,5	4,8	0,2889
6	5	14,2	5,9	0,3366
7	6	13,9	5,5	0,3436
8	7	16	6,8	0,4631
9	8	16,5	6,9	0,4919
10	9	15,8	6,8	0,4313
11	10	15	5	0,3177
12	11	14	5	0,3126
13	12	13,2	5	0,2991
14	13	14	6,4	0,3693
15	14	14,2	6	0,4016
16	15	13	4,5	0,2504
17	16	13,2	4,2	0,2211
18	17	11	5	0,2615
19	18	14,5	4	0,3126

Figura 2. Proceso de medición de las variables

Para este fin se dibujaron las siluetas de las hojas, usando estas como plantillas de molde, sobre un folio de papel de azúcar. Este proceso se hace con todas las piezas de hojas en cada

toma de muestra in situ. Luego, en el laboratorio, se cortan las siluetas dibujadas por el borde y se procede a realizar el siguiente proceso en cada una de las piezas de cada muestreo (Figura 2):

1. Se asigna un código numérico a cada silueta de papel de azúcar (correspondiente a las piezas tomadas en cada muestreo).
2. Se mide el largo y el ancho máximos de cada pieza anotando los valores en la matriz de datos básicos en Microsoft Excel (Tabla 1) en centímetros (cm). Para este fin, se usa una regla graduada que se pone junto con la silueta de papel de azúcar sobre un papel milimetrado que sirve como segundo referente de medida.
3. Se pesa en la silueta de papel de azúcar en balanza digital y se anota la medida en la matriz de datos básicos en Microsoft Excel en gramos (g)

$$AF = \frac{A \text{ cuadro} \times \text{Peso de la hoja}}{\text{Peso del cuadro}}$$

En la (tabla 3) se muestra la estructura de la matriz para recabar los datos de las variables asociadas a la hoja tales como largo, ancho, largo por ancho y silueta. La tabla fue destinada a recopilar mediciones básicas de las variables que pueden ser importantes para las investigaciones científicas tal como es la estimación del área foliar. Al tener columnas para largo, ancho y peso, permite comparar las variables. Estos datos son fundamentales en el cálculo para estimar el área foliar. Sirve para organizar la información de una manera estructurada y accesible, facilitando su análisis posterior.

Uso de los Datos:

A partir de los datos que se recogieron en la Tabla 3, se pueden realizar diferentes análisis, tales como: Cálculo de Proporciones y Medidas Descriptivas: Como promedios, medianas y desviaciones estándar de las mediciones, Análisis de Correlación: Evaluar si hay una relación significativa entre largo, ancho y peso. Desarrollo de Modelos: Utilizar estos

datos para crear modelos predictivos o de regresión que podrían ayudar a entender mejor las relaciones entre las variables. Visualización de Datos: Gráficos de dispersión, histogramas o boxplots para visualizar la distribución de las medidas.

Tabla 3. Matriz de datos de variables morfofisiológicas.

No hoja	Largo (cm)	Ancho (cm)	Largo x Ancho (cm ²)	Silueta (2/3 del Largo x Ancho) (cm ²)	Área Foliar real (cm ²)
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

Estas magnitudes se dividen en variables dependientes e independientes. Así, el largo, ancho, largo x ancho y silueta fueron denominados variables independientes y el área foliar la variable dependiente (Tabla 4).

Tabla 4. Sistemas de variables de investigación.

Variables independientes	Largo (cm)
	Ancho (cm)
	Peso (g)
	Largo x ancho (cm ²)
	Silueta (2/3 del Largo x Ancho) (cm ²)
	Área Foliar real (cm ²)
Variable dependiente	Área Foliar estimada (cm ²)

6.6 Procesamiento de la información

Una vez se registraron todos los datos de la matriz básica de datos y de la matriz de variables morfofisiológicas en el programa de Microsoft Excel, estos fueron exportados al software del programa estadístico SPSS 23. Donde se seleccionaron ocho diferentes tamaños de

muestra y, para cada caso, eligiendo una de las variables independientes y la estimación del AF (variable dependiente) aplicando primero el modelo de regresión lineal que, por no cumplir con todos los supuestos, obligó a la aplicación de los modelos de regresión curvilíneo para determinar cuál era el más apropiado.

Para el caso que ocupa esta investigación se usó el software SPSS en su versión 23 con el que se puede consultar datos de forma acelerada, así como, la formulación de hipótesis o ejecución de procedimientos que aclaran relaciones entre variables identificando las tendencias y dando la base de predicciones.

6.7 Análisis estadístico

Para decidir si se aplicó el modelo de regresión lineal para el análisis estadístico, se revisaron primero los supuestos de linealidad, independencia, normalidad, homocedasticidad y no colinealidad, de acuerdo con los conceptos expuestos en la tabla 1 en el marco teórico. Al no cumplirse con todos los supuestos del modelo de regresión lineal, se pasa a aplicar modelos de regresión curvilínea (Tabla 2) a partir de 50 hojas y sumando 50 cada vez hasta lograr 400 hojas los resultados se seleccionarán el más conveniente, lo que dependerá del valor del coeficiente de determinación (R^2) como primer factor y del valor de F del análisis de varianza (ANOVA) siempre que estén por encima del 80 % o 0, 80, así, el de mayor valor será el seleccionado.

Finalmente, la estimación del área foliar se realizará el modelo de regresión curvilíneo seleccionado, con el tamaño de muestra correspondiente y la variable independiente que dio origen a los resultados analizados.

7 Resultados y discusión

Los resultados de la investigación se dieron en 3 fases: El muestreo, ecuaciones de las 8 series de 50,100,150,200,250,300,350 y 400 hojas de tomate, la selección del modelo de regresión más efectivo para la estimación del AF del tomate chonto roble *S. lycopersicum*. y la estimación del área foliar propiamente dicha mediante el modelo seleccionado.

7.3 Muestreo

El proceso de muestreo se llevó a cabo según lo descrito en la metodología. Como se describió en la metodología, para cada una de las 8 tomas de muestras, se trabajó directamente en el cultivo bajo invernadero, las hojas de tomate chonto roble se cortaron de forma manual y se dibujó la silueta en el papel de azúcar inmediatamente in situ. Al final de cada jornada de toma de muestras, el material resultante fueron los folios de papel de azúcar con los dibujos de las 50 siluetas de las hojas cortadas.

Ya en el laboratorio, para cada toma de muestras se hizo un trabajo cuidadoso donde se cortaba un cuadrado de 4 cm² de papel de azúcar y se pesaba en la balanza digital. Luego, se recortaba la primera silueta por el borde del dibujo con precisión. Se medían el largo y ancho máximo con la regla graduada y sobre el papel milimetrado, anotando los datos. Luego se pesaba la silueta recortada y se anotaba la medida en la matriz de datos básicos. La acción se repetía con cada una de las 50 siluetas.

Una vez terminado el paso anterior, se construía la matriz de variables morfofisiológicas en el programa de Microsoft Excel. Para esto, en una hoja de cálculo se copiaba una columna con el largo, otra con el ancho y una más con el peso, es decir, los datos básicos. Se hizo también una columna con los datos del área del cuadro de papel de azúcar de 4 cm² y el peso de ese cuadrado, para que, de manera automática, generar mediante una fórmula el cálculo de medidas indirectas con largo x ancho, silueta y área foliar real.

7.4 Descripción de las 8 series de los modelos de regresión en las 400 hojas de tomate.

En el programa estadístico de SPSS 23, siguiendo el método Stepwise o método de selección de variables, para cada tamaño de muestra se seleccionó una de las variables independientes y su relación con la variable dependiente o área foliar tomate chonto roble *S. lycopersicum*. Al probar con todos los modelos de regresión curvilínea, para cada tamaño se conservaron para el análisis los que obtuvieron la condición fijada ($R^2 \geq 0,8$ y mayor valor F), esto generó ecuaciones de 7 a 10 modelos en cada análisis de todas las series hechas, a continuación, se mostraran todas las series y sus mejores modelos.

7.2.1 Serie 1 ecuaciones de regresión obtenidas entre las medidas del método curvilíneo en la muestra de 50 hojas

En el primer tamaño de muestra (50 hojas) se usó un método curvilíneo de cada uno de los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) de tomate de habito de crecimiento indeterminado usando como variable independiente la medida del largo de la hoja (L), el coeficiente de determinación que mostró el modelo de regresión curvilíneo con mejor desempeño fue el modelo de crecimiento con un R^2 de 0,950 y una F de 970,671 (en la tabla 5) ya que está por encima de 0.8. Sin embargo, cabe anotar que, los otros modelos mostraron valores de su coeficiente en un rango muy cercano (0,945 a 0,954) que marcó su diferencia por la medida del F del ANOVA.

Tabla 5. Resultados los modelos de regresión curvilíneo empleando el mejor modelo se ajustó para la serie 1 de 50 hojas del cultivo de tomate *S. lycopersicum*.

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de AF como variable dependiente	Coefficiente de variación (%) de L como variable independiente	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1	Probabilidad de β_2	Probabilidad de β_3
Logarítmico	$AF = -83,485\beta_0 + \beta_1 \ln[45,978]$	0,950	534,181	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Inverso	$AF = 76,102\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-542,361}$	0,943	817,893	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Cuadrático	$AF = 8,761\beta_0 - 0,269\beta_1 + (0,173)^2\beta_2$	0,954	509,76	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	
Cúbico	$AF = 8,582\beta_0 + 55,956\beta_1 + (0,132)^2\beta_2 + (0,002)^3\beta_3$	0,954	510,192	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p > 0,05$	$p < 0,05$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
Compuesto	$AF = 6,537\beta_0 + \beta_1 1,137$	0,952	970,671	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Potencia	$AF = (1,52 \beta_0 5 + L^{0,891} \beta_1)$	0,953	992,104	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
S	$AF = e^{4,827\beta_0 + (\beta_1 - 18,035-1)}$	0,951	961,838	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Crecimiento	$AF = \exp[1,877\beta_0 + 0,128\beta_1]$	0,950	970,671	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Exponencial	$AF = 6,537\beta_0 \exp[0,128\beta_1]$	0,952	970,671	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,144+0,970L)}}$	0,952	180,863	$p < 0,05$	10,6730	6,96	$p > 0,05$	$p < 0,05$		

7.2.2 Serie 2 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 100 hojas.

El segundo tamaño de muestra de (100) hojas, se logró obtener ecuaciones de regresión y medidas del método curvilíneo de cada uno de los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) de tomate chonto roble usando como variable independiente silueta (2/3 de largo x ancho), donde este fue el mejor modelo de crecimiento que obtuvo un coeficiente de 0,992 y un F de : 11887,465 delineado en la (tabla 6) dando una medida de alineación perfecta entre los datos observados y los datos estimados del AF del cultivo de tomate *S. lycopersicum*.

Tabla 6. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajusta para la serie 2 de 100 hojas del cultivo de tomate *S. lycopersicum*.

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de la variable dependiente AF	Coefficiente de variación (%) de la variable independiente S	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Logarítmico	$AF = -70,249\beta_0 + \beta_1 \ln[26,401]$	0,992	11887,465	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Inverso	$AF = 5275\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-1004,239}$	0,967	2891,969	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Compuesto	$AF = 9,624\beta_0 + \beta_1 1,025$	0,992	11887,465	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$
S	$AF = e^{4,281\beta_0 + (\beta_1 - 38,356-1)}$	0,992	11571,537	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Crecimiento	$AF = \exp[2,264\beta_0 + 0,025\beta_1]$	0,992	11887,465	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Exponencial	$AF = 9,624\beta_0 \cdot \exp[0,025\beta_1]$	0,992	11887,465	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,150+0,949L)}}$	1	616380,446	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p > 0,05$	$p < 0,05$

7.2.3 Serie 3 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 150 hojas.

En la tercera serie de 150 hojas tomadas del cultivo de tomate que se analizó a partir del programa estadístico SPSS 23. En este caso, las ecuaciones de regresión obtenida en el método curvilíneo de cada uno los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) y la variable independiente la S (silueta) (2/3 de largo x ancho), así sobresaliendo el R² ajustado del modelo de regresión curvilíneo de crecimiento con 0,986 y un F de 10691,461 delineada en la (tabla 7) ya que está por encima de 0.8, una media altamente aceptable.

Tabla 7. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajusta para la serie 3 de 150 hojas del cultivo de tomate chonto roble S. *lycopersicum*.

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de AF como variable dependiente	Coefficiente de variación (%) de S como variable independiente	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1	Probabilidad de β_2	Probabilidad de β_3
Logarítmico	$AF = -80,558\beta_0 + \beta_1 \ln[29,216]$	0,980	7289,703	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Inverso	$AF = 57,87\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-1195,047}$	0,939	2304,846	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Cuadrático	$AF = 1,173\beta_0 - 0,608\beta_1 + (0,001)^2\beta_2$	0,995	513849,428	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p > 0,05$	$p < 0,05$	$p > 0,05$	
Cúbico	$AF = 0,800\beta_0 + 0,637\beta_1 + (-1,585)^2\beta_2 + (5,674x 10^{-8})^3\beta_3$	0,995	13884,478	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p > 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p > 0,05$
Compuesto	$AF = 10,510\beta_0 + \beta_1^{1,023}$	0,986	10691,461	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Potencia	$AF = (0,654\beta_0 + \beta_1^{1,005\beta_1})$	0,997	57621,239	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
S	$AF = e^{4,360\beta_0 + (\beta_1 - 41,880 - 1)}$	0,982	8294,470	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Crecimiento	$AF = \exp[2,353\beta_0 + 0,023\beta_1]$	0,986	10691,461	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Exponencial	$AF = 10,514\beta_0 \exp[0,023\beta_1]$	0,986	10691,461	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p < 0,05$	$p < 0,05$		
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,131 \beta_0 + 0,986 \beta_1)}}$	0,992	19323,889	$p < 0,05$	18,10	17,92	$p > 0,05$	$p < 0,05$		

7.2.4 serie 4 Ecuaciones de regresión obtenidas del método curvilíneo para estimar el área foliar (AF) de tomate de la variedad chonto roble usando como variable independiente largo máximo x ancho máximo.

En la 4 serie de 200 hojas de tomate chonto roble S. *lycopersicum* en donde logramos tener ecuaciones de regresión obtenidas entre las medidas del método curvilíneo de cada uno de los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) del cultivo de tomate de la variedad chonto roble usando una variable independiente largo máximo x ancho máximo), debido a que el modelo no cumple con el supuesto de independencia, normalidad, homocedasticidad, se escogió un modelo curvilíneo de esta serie fue el crecimiento con un R² de 0,984 y el valor de F 12164,480 ya que este valor está por encima de 80 %.

Tabla 8. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo evidenciado de color amarillo el mejor modelo de regresión de la serie 4 de 200 hojas en el cultivo de tomate *S. lycopersicum*

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de la variable dependiente AF	Coefficiente de variación (%) de la variable independiente S	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Logarítmico	$AF = -101,433\beta_0 + \beta_1 \ln[31,395]$	0,984	12164,480	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Inverso	$AF = 62,221\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-2052,755}$	0,933	2771,115	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Compuesto	$AF = 11,445\beta_0 + \beta_1 1,014$	0,984	12164,480	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p < 0,05$	$p < 0,05$
S	$AF = e^{4,417\beta_0 + (\beta_1 - 88,525 - 1)}$	0,982	10721,730	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Crecimiento	$AF = \exp[2,438\beta_0 + 0,014\beta_1]$	0,984	12164,480	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Exponencial	$AF = 11,445\beta_0 \cdot \exp[0,014\beta_1]$	0,984	12164,480	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,095\beta_0 + 0,949\beta_1)}}$	0,995	39404,536	$p < 0,05$	19,89	19,88	$p > 0,05$	$p < 0,05$

7.2.5 Serie 5 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate chonto roble de la muestra de 250 hojas.

En la serie 5 de 250 hojas de tomate se obtuvieron ecuaciones de regresión con el método curvilíneo de cada uno de los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) y usando una variable independiente largo máximo x ancho máximo. De esta serie el mejor modelo fue el logístico como esta resaltado en la (tabla 9) con un R² 0,982 y un F 13612,188 como también hubo otros modelos cercanos con un R² 0.982 valores muy cercanos a el modelo elegido.

Tabla 9. Aplicación de regresión en los modelos curvilíneo resaltando el mejor modelo para que fue logístico para la serie 5 de las 250 hojas de tomate *S. lycopersicum*.

	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de AF como variable dependiente	Coefficiente de variación (%) de LXA como variable independiente	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Logarítmico	$AF = -110,222\beta_0 + \beta_1 \ln[33,491]$	0,982	13612,188	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Inverso	$AF = 66,299\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-2307,399}$	0,923	3006,697	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Compuesto	$AF = 12,182\beta_0 + \beta_1 1,013$	0,982	13612,188	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p < 0,05$	$p < 0,05$
S	$AF = e^{4,477\beta_0 + (\beta_1 - 70,277-1)}$	0,979	113612,188	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Crecimiento	$AF = \exp[2,500\beta_0 + 0,013\beta_1]$	0,982	13612,188	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Exponencial	$AF = 12,182\beta_0 \exp[0,013\beta_1]$	0,982	13612,188	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,008 \beta_0 + 0,981 \beta_1)}}$	0,994	41976,203	$p < 0,05$	21,47	21,47	$p > 0,05$	$p < 0,05$

7.2.6 Serie 6 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 300 hojas.

En la sexta serie de 300 hojas tomadas del cultivo de tomate que se analizó a partir del programa estadístico SPSS 23. En este caso, las ecuaciones de regresión obtenida en el método curvilíneo de cada uno los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) y la variable independiente largo máximo x ancho máximo), así sobresaliendo el modelo de crecimiento con un aproximado de un R² 0,980 y un F 14305,174 delineada en la (tabla 10) ya que está por encima de 0.8, una media altamente excelente, aunque también se logró ver que otros modelos tuvieron con un rango promedio de 0,9838 muy aproximado.

Tabla 10. Aplicación de regresión en los modelos curvilíneo resaltando el mejor modelo para que fue crecimiento para la serie 6 de las 300 hojas de tomate chonto roble *S. lycopersicum*

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de la variable dependiente AF	Coefficiente de variación (%) de la variable independiente LXA	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Logarítmico	$AF = -119,383\beta_0 + \beta_1 \ln[35,647]$	0,98	14305,174	$p < 0,05$	23,16	23,16	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Inverso	$AF = 70,438\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-2577,846}$	0,912	3107,724	$p < 0,05$	23,16	23,16	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Compuesto	$AF = 12,945\beta_0 + \beta_1^{1,012}$	0,980	14305,174	$p < 0,05$	23,16	23,16	$p < 0,05$	$p < 0,05$
S	$AF = e^{4,534\beta_0 + (\beta_1 - 73,990)}$	0,975	11693,117	$p < 0,05$	23,16	23,16	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Crecimiento	$AF = \exp[2,561\beta_0 + 0,012\beta_1]$	0,980	14305,174	$p < 0,05$	23,16	23,16	23,16	$p < 0,05$
Exponencial	$AF = 12,945\beta_0 \exp[0,012\beta_1]$	0,980	14305,174	$p < 0,05$	23,16	23,16	23,16	$p < 0,05$
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,083\beta_0 + 0,983\beta_1)}}$	0,993	40353,924	$p < 0,05$	23,16	23,16	$p > 0,05$	$p < 0,05$

7.2.7 Serie 7 Ecuaciones de regresión obtenidas del método curvilíneo para estimar el área foliar (AF) de tomate de la variedad chonto roble usando como variable independiente largo máximo x ancho máximo

En las séptima serie de 350 hojas se evidenciaron ecuaciones de regresión obtenidas entre las medidas del método curvilíneo de cada uno de los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) de tomate de habito de crecimiento indeterminado de la variedad chonto roble usando como variable independiente largo máximo x ancho máximo, mostrándonos que el mejor modelo de regresión en esta serie fue el de crecimiento con un porcentaje aproximado de R² 0,975 y un F de 13690,865 siendo el modelo con el porcentaje más alto, como también logramos obtener que otros modelos de la misma (tabla 11) llegaron a aproximarse con un R² 0,975 logrando aproximarse al modelo crecimiento.

Tabla 11. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajusta para la serie 7 de 350 hojas del cultivo de tomate *S. lycopersicum*.

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de AF como variable dependiente	Coefficiente de variación (%) de LXA como variable independiente	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Logaritmico	$AF = -130,540\beta_0 + \beta_1 \ln[38,237]$	0,975	13690,865	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Inverso	$AF = 75,236\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-2906,770}$	0,895	2966,069	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Compuesto	$AF = 13,879\beta_0 + \beta_1^{1,011}$	0,975	13690,865	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p < 0,05$	$p < 0,05$
S	$AF = e^{4,588\beta_0 + (\beta_1 - 78,157 - 1)}$	0,975	11273,336	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Crecimiento	$AF = \exp[2,630\beta_0 + 0,011\beta_1]$	0,975	13690,865	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Exponencial	$AF = 13,879\beta_0 \exp[0,011\beta_1]$	0,975	13690,865	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,077\beta_0 + 0,984\beta_1)}}$	0,995	36432,502	$p < 0,05$	25,42	25,41	$p > 0,05$	$p < 0,05$

7.2.8 Serie 8 ecuaciones de regresión mediante el modelo curvilíneo en el cultivo de tomate de la muestra de 400 hojas.

En la octava serie de 400 hojas tomadas del cultivo de tomate que se analizó a partir del programa estadístico SPSS 23. En este caso, las ecuaciones de regresión obtenida en el método curvilíneo de cada uno los supuestos del modelo para estimar el área foliar (AF) y la variable independiente (largo máximo x ancho máximo), logrando sobresalir modelo logista con u mayor rango de R² 0,962 y un F de 10090,135 delineada en la (tabla 12) una media altamente aceptable, aunque otros diferentes modelos mostrado en la (tabla 12) obtuvieron un rango promedio de R² 0,962 siendo los rangos más aproximados al mejor modelo que fue el de crecimiento.

Tabla 12. Aplicación de los modelos de regresión curvilíneo resaltando el mejor modelo que más se ajustó para la serie 8 de 400 hojas del cultivo de tomate chonto roble *S. lycopersicum*.

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%) de la variable dependiente AF	Coefficiente de variación (%) de la variable independiente S	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Logarítmico	$AF = -133,466\beta_0 + \beta_1 \ln[42,864]$	0,962	10090,135	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Inverso	$AF = 83,053\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{-2318,525}$	0,849	2246,591	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Compuesto	$AF = 15,621\beta_0 + \beta_1 1,015$	0,962	10090,135	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p < 0,05$	$p < 0,05$
S	$AF = e^{4,882\beta_0 + (\beta_1 - 58,341 - 1)}$	0,958	9085,899	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Crecimiento	$AF = \exp[2,749\beta_0 + 0,015\beta_1]$	0,962	10090,135	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Exponencial	$AF = 15,621\beta_0 \cdot \exp[0,015\beta_1]$	0,962	10090,135	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Logística	$AF = \frac{1}{1 + e^{-(0,073\beta_0 + 0,877\beta_1)}}$	0,992	48765,078	$p < 0,05$	30,25	30,25	$p > 0,05$	$p < 0,05$

7.5 Selección del modelo de regresión que más se ajustó a los datos

Dada la estimación del área foliar del tomate chonto roble *S. lycopersicum* usando un modelo de regresión, siguiendo la metodología, en primera estancia se analizó la posibilidad de aplicar un modelo de regresión lineal, pero este no cumplió con los supuestos de independencia, normalidad, homocedasticidad. Por lo que, se aplicaron modelos de regresión curvilínea eligiendo los que obtuvieran un coeficiente de determinación R^2 por encima del 80 % o 0,8 y, el mayor valor F del análisis de varianza (ANOVA).

Lo que se evidencio, es que los modelos de regresión curvilínea que obtuvieron los mejores datos según la condición fijada fueron, para la mayoría en todas las series, fue el modelo de crecimiento, como se describió en la (Tabla 13).

Tabla 13. Modelos de regresión curvilínea con mejor R^2 en cada serie.

Tamaño de muestra	Variable independiente	Variable dependiente	Modelo de mejor resultado	RR^2	F
50	Largo	Área Foliar tomate chonto roble S. <i>Lycopersicu</i> m.	crecimiento	0,950	970,671
100	Silueta		Crecimiento	0,992	11887,465
150	Silueta		crecimiento	0,986	10691,461
200	Silueta		crecimiento	0,984	12164,480
250	Largo x Ancho		crecimiento	0,982	13612,188
300	Largo x Ancho		crecimiento	0,980	14305,174
350	Largo x Ancho		crecimiento	0,975	13690,865
400	Silueta		Crecimiento	0,962	48765,078

Este análisis estadístico se convierte en una constante para los tamaños de muestra que siguieron en los que el modelo de crecimiento siempre obtuvo los R^2 más altos. Las series 4 a 8 obtuvieron promedios en sus coeficientes de determinación de 0,984, 0,982, 0,980, 0,975, 0,962 respectivamente, lo que hace también deducir que entre más grande la muestra, menor el promedio de R^2 obtenido, es decir, una relación inversamente proporcional entre estos dos factores.

No obstante, el coeficiente de determinación R^2 de mayor valor corresponde a 0,992 que es el del modelo crecimiento aplicado en el tamaño de muestra de 100 piezas donde las variables involucradas fueron la silueta y el área foliar (Tabla 13). Es decir, con los datos de la segunda serie y aplicando la ecuación de dicho modelo, se obtuvo un coeficiente de determinación máximo (tabla 8 de la serie 3). Así, al aplicar el modelo de regresión curvilíneo logístico, el AF estimada del *S. lycopersicum*. dependerá de la variable independiente silueta, según lo indica la ecuación:

$$AF = \exp [2,264 + 0,025]$$

Tabla 14. Modelo de regresión curvilíneo seleccionado

Modelo	Ecuación	R ² ajustado	Valor de F del modelo	Probabilidad del modelo de regresión	Coefficiente de variación (%)de la variable dependiente AF	Coefficiente de variación (%)de la variable independiente S	Probabilidad de β_0	Probabilidad de β_1
Crecimiento	$AF = \exp[2,264\beta_0 + 0,025\beta_1]$	0,992	11887,465	$p < 0,05$	15,83	15,87	$p < 0,05$	$p < 0,05$

Los datos que acompañan esta selección muestran la estimación del error estándar de 0,005 y el F del ANOVA de 970,671 y los coeficientes del modelo de crecimiento.

7.6 Estimación del área foliar con el modelo de regresión curvilíneo crecimiento.

Como el resultado, del modelo de regresión curvilíneo de crecimiento fue el más apropiado para la estimación del área foliar de la especie de estudio, se aplicó un análisis estadístico para permitir observar la predicción del AF real ya que el modelo nos predijo un error es cero, con la siguiente ecuación del modelo de crecimiento.

$$AF = \exp[2,264 + 0,025]$$

Tabla 15. Ecuación para estimar el área foliar

Modelo	Ecuación	B0 intersección	B1 Pendiente	Silueta B2	(%) estimada
Crecimiento	$AF = \exp[2,264\beta_0 + 0,025\beta_1]$	2,64	0,025	30,6	30,11429572
		2,64	0,025	44,3	42,41491206
		2,64	0,025	44	42,26439411
		2,64	0,025	43,2	41,26439411
				Suma	155,8915921

Dada lo anterior, en la (tabla 15) se tomaron los datos de la ecuación exponencial del modelo de crecimiento que en este caso B0 siendo la intercepción 2,64 y B1 la pendiente 0,025 multiplicado por el área de la silueta de la hoja de tomate de 4 muestras no más, así mismo nos dio un porcentaje de estimada muy cercano a la del tamaño real de la silueta donde vemos unos valores muy parecidos, dando como resultado un error de cero logrando predecir que con el modelo de crecimiento podemos hallar el área foliar real (AF real) de la matriz de datos de variables morfofisiologías y el área foliar estimada (AF estimada), La (tabla 15) nos ayudó a demostrar que el mejor modelo es el de crecimiento en la serie 2 de 100 hojas ya que refleja con un coeficiente de ($R^2 = 0,992$), es decir, que los datos obtenidos con el porcentaje estimado que implica una aproximación exacta entre los datos calculados por los procesos de medición directa (área foliar real) y los datos que el modelo permite calcular (área foliar estimada), en el cultivo de tomate de la variedad *S. lycopersicum*, y así lograr obtener un cultivo sano en plena producción, disponible para la fotosíntesis, transpiración y los procesos metabólicos dando mejores resultados.

7.5 Discusión de resultados

Los estudios botánicos reconocen a las plantas como el órgano fisiológico de la fotosíntesis, donde el flujo de gases y la transferencia de radiación solar permite el crecimiento de los individuos vegetales, por tanto, determinar el área foliar tiene relación directa con el análisis de cómo están muchos de los “procesos agronómicos, biológicos, ambientales y fisiológicos, que incluyen el análisis de crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración, la interceptación de luz, la asignación de biomasa y el balance de energía” (Mejía, 2022). Entonces, los datos obtenidos al medir el AF permiten tomar decisiones en cuanto a podas, fertilización, irrigación y aplicación de productos químicos (Montoya et al., 2017), así como, modelar los mecanismos de hidratación y exposición a la radiación.

De lo anterior, diversos estudios consultados como referentes han medido variables de tipo morfofisiológicas foliar con el fin de determinar los efectos de la cantidad de radiación solar

captada y de humedad retenida que, tienen relación con las condiciones ecológicas y de cambio climático que tiene el planeta. Por esto, cobra importancia cualquier aporte en la tecnificación de las decisiones de riego, poda y protección que tomen los cultivadores, puesto que, los datos que puedan recolectar de sus plantaciones predecirán condiciones de estrés hídrico o de disminución de biomasa de los individuos que la conforman (Melo et al., 2012).

En este caso, se optó por usar un método destructivo en el proceso de muestreo en el que, las hojas eran arrancadas de la planta para ser dibujadas en silueta en papel de azúcar en el mismo sitio de recolección, con el fin de evitar los errores de medida por reducción del área foliar de las hojas verdes que se marchitan con rapidez una vez cortadas. Esto permitió a la investigadora realizar el resto del proceso en el laboratorio con más calma y precisión.

Ahora, teniendo en cuenta que las tasas entre dos magnitudes fisiológicas o morfológicas son proporcionales, determinar un modelo apropiado de estimación depende de la comparación de las variables y del análisis de lo que sucede en la realidad de los procesos. Así, “el modelo sugiere que el organismo no es una suma de partes, sino que, en él, cada parte está estrechamente vinculada con todas las demás y que, entre ellas hay una armonía esencial” (Sánchez y Gutiérrez, 2020.) y, por tanto, un cambio en una de estas partes desencadena cambios en las demás.

Los trabajos consultados como referentes mostraron que, en este proceso, usar medidas lineales del largo o ancho de la hoja como medida para estimar el AF ha sido determinada como altamente confiable, sobre todo en especies forestales, pero, es más preciso calcular el producto de estas medidas en especies como el mijo, el tomate, el durazno o el ciruelo (Cabezas et al., 2009; Leite et al., 2019; Astegiano et al., 2001; Casierra et al., 2017). Pero no se pueden generalizar las ecuaciones para todas las especies, así que, es más confiable realizar pruebas estadísticas y de campo en cada caso y validar su aplicación y repetición con el tiempo (Mejía, 2022).

Para el caso que ocupó esta investigación se usó el software SPSS 23 permitió procesar los datos de forma acelerada y formular hipótesis con la ejecución de procedimientos que aclaran relaciones entre variables identificando las tendencias y dando la base de predicciones.

Los datos obtenidos fueron primero analizados para aplicar el modelo de regresión lineal en la estimación del AF, pero como esto depende del cumplimiento de la totalidad los supuestos de linealidad, independencia, normalidad, homocedasticidad y no colinealidad, al no cumplirlos, se recurrió a la elección de un modelo de regresión curvilínea.

El análisis comparativo de modelos de regresión de estimación curvilínea para el AF permitió establecer el modelo ofreció una mejor medida de ajuste de regresión R^2 , es decir, el porcentaje de varianza en el campo de destino más alto. Así, el valor 0,992 de la serie de 100, indicó un margen de error menor y, por tanto, un modelo de mayor precisión. También se evaluaron el nivel de significancia del 5%, distribución F, significación del modelo en su análisis de varianza (ANOVA) $P < 0,05$ la significancia de los parámetros de regresión. Así, el modelo que mejor cumplió estas características después de probar con 8 tamaños diferentes de muestra y relacionar diferentes tipos de variables independientes con la variable dependiente del AF fue el modelo de regresión curvilínea crecimiento.

Al comparar con los estudios referentes, el caso que se desarrolló coincidió en sus métodos con el de Khan et al. (2016) que, aunque usaron un modelo no destructivo si midieron las mismas magnitudes (Largo, Ancho y Peso) y luego, basados en los diversos coeficientes de regresión o factores foliares posibles, estimaron el área de las muestras de hojas posteriores, valiéndose de programas informáticos como Excel y SPSS 23. Otro proceso semejante lo realizaron Rincón y Mora (2024) en la estimación del AF en mora uva y curuba quienes establecieron el mejor tamaño de muestra para estimar el área foliar por el método indirecto del uso de regresión lineal bivariada y curvilínea y, luego, identificaron las variables de regresión resultantes.

En ese caso, como en el de la presente investigación, las ecuaciones encontradas permitieron determinar con alto nivel de precisión el AF de las especies estudiadas convirtiéndose en una herramienta técnica para el manejo de estos cultivos desde un modelo matemático superando los métodos automatizados.

Una observación puntual del caso que ocupó la presente investigación, respecto al coeficiente de determinación (R^2) registrado en los diferentes tamaño de muestra con los modelos de regresión curvilíneo aplicados, evidencia que los datos oscilaron entre 0,849 y 1, pero la mayoría de estos (52 %) estuvieron en el intervalo de 0,98 y 0,992 lo que indica la cercanía de los datos del método de cálculo del AF real y el AF estimada desde los diferentes modelos de regresión curvilíneo que llevó a que el seleccionado, es decir, el modelo de crecimiento tuviera un $R^2 = 0,992$. En esto es similar a otros estudios de enfoque cualitativo para la estimación del AF como el de Unirrago et al. (2015) quienes determinaron un rango para el coeficiente de determinación de 0,93 a 0,99 para los modelos evaluados en ese caso, una prueba de que la estimación del AF con base en modelos de regresión suelen tener un alto grado de precisión.

Ahora, cuando se determina un modelo de regresión puntual, como fue el resultado obtenido en el presente estudio, la ecuación obtenida orienta las futuras mediciones en el cultivo estudiado dependiendo de la variable independiente que se incluye. Si como en este caso, de acuerdo con la ecuación,

$$AF = \exp[2,264 + 0,025]$$

La variable independiente es silueta 2/3 del largo x ancho la hoja de tomate (S) facilitará incluso optar por un método no destructivo, lo que no sucede si existiera la necesidad de incluir la medida del Ancho porque esta última medición requiere la consideración de una línea imaginaria perpendicular al diámetro ecuatorial de la hoja, que no está claramente definido dada la irregularidad de la superficie foliar (Antunes et al., 2008; Unirrago et al., 2015).

Por tanto, aunque en el proceso de selección de un modelo de regresión apropiado para la estimación del AF se usó un método destructivo, en las futuras mediciones se puede prescindir de este y, por ende, evitar pérdida de material vegetal y el uso de materiales costosos para la medición. Todo esto porque, tal y como han demostrado varios estudios, los modelos estadísticos para estimar el AF son herramientas que facilitan la recolección de datos, siendo “simple, barato, rápido, fiable y no destructivo” (Quevedo et al., 2017.)

8 Conclusiones

Con este estudio se puede concluir que el modelo de regresión más apropiado para estimar el área foliar para el tomate chonto roble *S. lycopersicum*. cultivado en la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander) es el modelo crecimiento con la ecuación resultante:

$$AF = \exp[2,264 + 0,025$$

Esta ecuación indica que se puede estimar el área foliar cultivo a partir de la medida de la hoja de tomate y puede hacerse a través de diferentes métodos, siendo el más aconsejable un método no destructivo para reducir el posible impacto sobre las plantas del cultivo.

Para llegar a esta conclusión, se partió con la medición de variables morfofisiológicas como el largo, ancho y peso de la hoja de tomate chonto roble *S. lycopersicum* que permitieron el cálculo de otras como largo x ancho, silueta (2/3 de largo y ancho) y área foliar real (u observada). Datos con los que, a través del programa estadístico SPSS 23 se determinó que el modelo de regresión lineal no era aplicable pues no cumplía con los supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad. Por esto, tras acudir a los modelos de regresión curvilínea, se eligieron los que mayor F con un coeficiente de determinación (R^2) por encima de 0,8 (80 %) que, tras probar con ocho diferentes tamaños de muestra y enfrentando diversas variables independientes con el área foliar (AF) llevó a que se eligiera la ecuación del modelo de regresión curvilínea crecimiento, puesto que su R^2 fue de 0,992 (coincidencia del 100 % sin margen de error).

9 Recomendaciones

El método para toma de muestra utilizado puede ser ejecutado con facilidad por cualquiera de los trabajadores del cultivo que, mediante una capacitación sencilla podrá medir el largo de las hojas luego de dibujar cada silueta en papel de azúcar y usar herramientas de medida a su alcance como el papel milimetrado o una regla de precisión. En ese sentido, la recomendación específica para la finca Los Pitos (San José de Miranda, Santander) es capacitar a diferentes trabajadores en la toma de muestra, medición y registro de variables para que el administrador o técnico contratado pueda hacer el procesamiento respectivo en una hoja de cálculo preparada con la ecuación del modelo seleccionado mediante el presente estudio (modelo de regresión curvilínea de crecimiento) y, así, estimar el área foliar del tomate chonto roble *S. lycopersicum*.

No obstante, para futuras investigaciones, se recomienda métodos no destructivos de medición como el uso de programas de procesamiento digital de imagen tipo ImageJ que permite el cálculo de las variables desde una imagen de alta resolución, siempre cuidando en la recolección de imágenes hacer la debida marcación según la codificación que se le dé a las muestras. Y, luego, si es necesario, proponer a quienes trabajen en este tipo de cultivos esta u otras alternativas de toma de muestra y procesamiento de datos que se adapten a los conocimientos y habilidades de quienes están en contacto permanente con las plantaciones.

10 Referencias

- ACIS. (2023). *La producción de Tomate en Colombia alcanza las 512 mil toneladas al año*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas.
- Antunes, W., Pompelli, M., & Carretero, D. D. (2008). Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). *Annals of Applied Biology* (153), 33 - 40.
- Astegiano, E., Favaro, J., & Bouzo, C. (2001). Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizandomedidas foliares lineales. *Investigación Agropecuaria: Producción y Protección Vegetal*, 16(2), 250-256.
- Bautista, D. (2016). *Evaluación de dos métodos para medir el índice de área foliar dle tomate en invernadero*. México: Universidad Autónoma Agraria.
- Burbano, E., & Vallejo, F. (2017). Producción de líneas de tomate “chonto” *Solanum lycopersicum* Mill., con expresión del gen *sp* responsable del crecimiento determinado. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*, 11, 63-71.
- Cabezas, M., Peña, F., Duarte, H., Colorado, J., & Lora, R. (2009). Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(1), 121-130.
- Casierra, F., Zapata, V., & Cutler, J. (2017). A comparison of direct and indirect methods for estimating leaf area in peach (*Prunus persica*) and plum (*Prunus Salicina*) Cultivars. *Revista colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 30-38.
- Chacma, E., & Lara, T. (2021). Investigación cuantitativa: buscando la estandarización de un esquema taxonómico. *Revista Médica de Chile*, 1382-1383. Obtenido de <https://www.scielo.cl/pdf/rmc/v149n9/0717-6163-rmc-149-09-1382.pdf>
- Cirillo, C., Pannico, A., Basile, B., Rivera, C., Giaccone, M., Colla, G., . . . Roupheal, Y. (2017). A simple and accurate allometric model to predict single leaf area of twenty-one European apricot cultivars. *European Journal of Horticultural Science*, 82(2), 65-71.
- Citadinni, E., & Peri, P. (2006). Estimation of leaf area in sweet cherry using a non-destructive method. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), 143-150.

- Colombia agrícola. (2024). *Norte de Santander, otra despensa alimentaria de Colombia*. Colombia agrícola. Obtenido de <https://colombiagricola.com/2024/01/15/norte-de-santander-despensa-alimentaria-de-colombia/#:~:text=El%20tomate%20chonto%20nortesantandereano%20es,Chin%C3%A1cota%2C%20Labateca%20y%20Villa%20Caro>.
- DNP. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022- 2026* . Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- Erlacher, W., Oliveira, F., Fialho, G., Silva, D., & Carvalho, A. (2016). Models for estimating yacon leaf area. *Horticultura Brasileira* (34), 422-427.
- González, C. (2018). *Estudio de líneas derivadas del programa de mejora genética de variedades tradicionales de tomate (Solanum lycopersicum L.) de la EPSO-UMH*. Universidad Miguel Hernández.
- Gobernación de Santander. (2020). *Plan departamental de extensión agropecuaria (2020-2023)*. Bucaramanga: Gobernación de Santander.
- Hernández, N., & Flórez, C. (2008). *Proeycto de caracterización de San José de Miranda*. Málaga: UNAD.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill.
- Jaime, M., Álvarez, J., & Camacho, J. (2023). Modelo no destructivo para estimar el área foliar individual mediante parámetros alométricos en gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*). *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient*, 26(2), 1-9.
- Jaramillo, J., Rodríguez, P., Guzmán, M., & Zapata, M. (2006). *El cultivo de tomate bajo invernadero*. Rionegro, Antioquía: Corpoica.
- Khan, F., Banday, F., Narayan, S., Khan, F., & Bhat, S. (2016). Use of Models as Non-destructive Method for Leaf Area Estimation in Horticultural Crops. *IRA-International Journal of Applied Sciences*, 4(1), 162-180.
- Küçükönder, H., Boyacı, S., & Akyüz, A. (2016). A modeling study with an artificial neural network: developing estimation models for the tomato plant leaf area. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 1-10. doi: doi:10.3906/tar-1408-28
- Leite, M., de Lucena, L., d. C., & de Sá Júnior, E. (2019). Leaf area estimate of *P. glaucum* by linear dimensions. *Acta Scientiarum - Animal Sciences*, 41(1).

- Ley 101. (1993). *Ley General de Desarrollo Agropecuario y Pesquero*. Bogotá, 23 de diciembre de 1993: Diario Oficial: 41149.
- Ley 1876. (2017). *Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria*. Bogotá, 29 de diciembre de 2017: Diario Oficial 50461.
- Martínez, V. (2013). Paradigmas de la investigación. *Biblioteca UDGvirtual*, 1-11.
- Mejía, J. (2022). *Determinación del área foliar mediante métodos no destructivos en Solanum betaceum Cav.* Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/39408/6/Trabajo%20de%20Titulacion.pdf>
- Melo, O., Martínez, E., & Correa, G. (2012). Indicadores Morfométricos foliares para la detección temprano del estrés hídrico de Gmelina arborea en sistemas agroforestales. *Colombia Forestal*, 15(2), 215-227.
- Mendoza, C., Ramírez, C., Martínez, A., Ojeda, W., Ruelas, J., Ascencio, R., . . . Núñez, F. (2022). Leaf area and its impact in yield and quality of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 54(1), 57-69.
- MinCit. (2024). *Perfiles económicos departamentales. Departamento de Santander*. Bogotá: Ministerio de comercio, industria y turismo. Obtenido de <https://www.mincit.gov.co/CMSPages/GetFile.aspx?guid=343b884d-95de-4e64-8f0f-f76334a7dd74>
- Montoya, E., Hernández, D., Arredondo, J., Muñoz, Á., & Flórez, C. (2017). Estimación del área foliar en café variedad castillo a libre exposición y su relación con la producción. *Cenicafé*, 68(1), 55-61.
- Müggenburg, M., & Pérez, I. (2007). Tipos de enfoque de la investigación cuantitativa. *Revista Enfermería Universitaria ENEO-UNAM.*, 1(4), 35-39.
- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030*. New York: Organización de las Naciones Unidas.
- Quevedo, E., Cancino, G., & Barragán, A. (2017). Modelos de regresión para estimar el peso seco de los órganos y área del limbo del duraznero, variedad Jarillo. *Revista U.D.C.A.*, 20(2), 299-310.

- Rincón, E., & Mora, M. (2024). *Determinar el Área Foliar de los Cultivos Mora Uva Rubus floribundus Kunth y Curuba Passiflora tripartita var. mollissima (Kunth) L. H. Bailey cómo Determinante Fisiológico de Producción Agronómica en Pamplona, Norte de Santander, Colombia*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Sánchez, F., & Gutiérrez, J. (2020). La alometría, una ley de potencias ubicua en la estructura de los seres vivos. *Interdisciplina*, 8(20), 11-22.
- Statista. (2023). *Volumen de tomates frescos producidos en el mundo*. Statista.com. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/529413/produccion-de-tomates-frescos-en-el-mundo/#:~:text=Entre%202012%20y%202021%2C%20el,en%20todo%20el%20periodo%20estudiado>.
- Unirrago, C., Hernpandez, J., Montoya, e., Medina, R., Ibarra, L., Carmona, C., & Flórez, P. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (*Coffea arabica* L.) of the Castillo variety. *Crop Production and Management*, 74(4), 412 -416.

11. Anexos

Anexos 1. Matrices de datos básicos y de variables morfofisiológicas.

Autoguardado MATRIZ DE DATOS Buscar												
O19 fx												
	A	B	C	D	F	G	H	I	J	K	L	M
1	No Hojas	Largo (cm)	Ancho(cm)	Peso (gr)					# Hojas	Largo (cm)	Ancho(cm)	Peso (gr)
2	1	10,2	4,5	0,1975					51	14	4,5	0,2262
3	2	15,5	4,3	0,3311					52	14,5	4	0,2301
4	3	13,2	5	0,3165		Peso cuadro: 0,0275			53	13,2	4	0,1815
5	4	13,5	4,8	0,2889					54	16	6	0,3066
6	5	14,2	5,9	0,3366					55	16,2	6,2	0,3228
7	6	13,9	5,5	0,3436					56	14,8	6,8	0,2906
8	7	16	6,8	0,4631					57	14	4,9	0,2516
9	8	16,5	6,9	0,4919					58	13	5	0,2071
10	9	15,8	6,8	0,4313					59	12,2	4,5	0,1788
11	10	15	5	0,3177					60	14,5	4	0,1985
12	11	14	5	0,3126					61	12,6	4,7	0,1857
13	12	13,2	5	0,2991					62	12	5,5	0,2207
14	13	14	6,4	0,3693					63	15	4,8	0,2271
15	14	14,2	6	0,4016					64	11	4,5	0,1864
16	15	13	4,5	0,2504					65	10,5	5	0,2152
17	16	13,2	4,2	0,2211					66	14	4	0,2646
18	17	11	5	0,2615					67	14,5	4,2	0,2469
19	18	14,5	4	0,3126					68	12,3	5,3	0,2544
20	19	14	5,3	0,3012					69	12	5,5	0,2468
21	20	13,5	5	0,2696					70	13,5	4	0,2181
22	21	10,5	4	0,2149					71	13,8	4,2	0,2592
23	22	13	4	0,2343					72	15,3	5	0,3321
24	23	15	5,8	0,4025					73	15,5	4,5	0,3047
25	24	14	5,5	0,3014					74	18	5	0,3674
26	25	13,6	5,8	0,3424					75	17,9	7	0,4651

Anexos 2. Matrices de datos básicos en el programa de Excel de las 400 hojas de tomate contó roble.

Autoguardado

<

