

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

CURVAS DE ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y POTASIO EN TOMATE BAJO
INVERNADEROS CON DISTINTOS NIVELES DE FERTIRRIGACION

por

Jonathan LOPEZ

Trabajo final de grado presentado como
uno de los requisitos para obtener
el título de Ingeniero Agrónomo

SALTO
URUGUAY
2023

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora: -----

Ing. Agr. (Dra.) Cecilia Berrueta

Tribunal: -----

Ing. Agr. (Dr.) Rafael Grasso

Ing. Agr. (Dr.) Santiago Dogliotti

Ing. Agr. (Dra.) Paula Colnago

Ing. Agr. (Dra.) Cecilia Berrueta

Fecha: 7 de febrero de 2023

Autor: -----

Jonathan López

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia por acompañarme a lo largo de esta etapa y brindarme el apoyo necesario para poder culminar esta maravillosa carrera.

A la estación Las Brujas del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo.

A la Ing. Agr. Cecilia Berrueta y al Ing. Agr. Rafael Grasso por su guía y ayuda en cada etapa del trabajo.

Al Ing. Agr. Santiago Dogliotti por su asesoramiento en las etapas finales del trabajo.

A todos los funcionarios del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) que participaron en este trabajo.

A los docentes y funcionarios de Facultad de Agronomía que en algún momento participaron en esta etapa.

Y a todas las personas que me dieron su apoyo a lo largo de estos años.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE CUADROS	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 TOMATE EN URUGUAY	3
2.2 EL CULTIVO DE TOMATE	4
2.2.1 Taxonomía	4
2.2.2 Características botánicas	5
2.2.3 Formación del rendimiento	7
2.2.4 Factores determinantes del rendimiento	10
2.3 DINÁMICA DE NUTRIENTES EN LA PLANTA	13
2.3.1 Nitrógeno	14
2.3.2 Potasio	15
2.3.3 Relación Potasio/Nitrógeno	16
2.4 FUENTES DE NUTRIENTES	17
2.4.1 Nitrógeno	17
2.4.2 Potasio	18
2.5 ABSORCIÓN DE NUTRIENTES	19
2.6 REQUERIMIENTO DE NUTRIENTES	21
2.7 CURVAS DE ABSORCIÓN	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 UBICACIÓN	24
3.2 CLIMA	24
3.3 SUELO	25
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS Y DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO	26

3.4.1	Diseño de los tratamientos	26
3.4.2	Diseño experimental	27
3.5	MANEJO DEL CULTIVO	28
3.5.1	Desbrotes	28
3.5.2	Capado o despunte	28
3.5.3	Deshoje:	28
3.5.4	Cosecha	29
3.5.5	Riego	30
3.5.6	Fertilización	30
3.5.6.1	Aportes de nutrientes	33
3.5.7	Control de malezas, enfermedades y plagas	34
3.6	PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS DE ABSORCIÓN	34
3.7	ANÁLISIS DE DATOS	37
3.7.1	Verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas.	37
3.7.2	Método de análisis.	37
4.	RESULTADOS	38
4.1	ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA.	38
4.2	RENDIMIENTO DE FRUTA FRESCA	40
4.3	ABSORCIÓN DE NUTRIENTES	41
4.3.1	Absorción de nitrógeno	41
4.3.2	Absorción de potasio	43
4.3.3	Absorción de nutriente por etapa	45
4.4	ABSORCIÓN DE NUTRIENTES POR TONELADA	47
4.5	EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES	48
4.6	RELACIÓN DE ABSORCIÓN ENTRE POTASIO Y NITRÓGENO	48
5.	DISCUSIÓN	49
5.1	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS DE FERTIRRIEGO	49
5.2	CONSUMO DE NUTRIENTES POR EL CULTIVO.	51
5.4	RELACIÓN ENTRE NUTRIENTES	52
6.	CONCLUSIÓN	54

7.	RESUMEN -----	56
8.	SUMMARY -----	57
9.	BIBLIOGRAFÍA -----	58

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura N° 1: Precio e ingreso de tomate al Mercado Modelo (2019)	4
Figura N° 2: Unidad de crecimiento en la planta de tomate (“simpodio”)	6
Figura N° 3: Hoja y flor de la planta de tomate.	7
Figura N° 4: Modelo cualitativo de la formación de rendimiento de un cultivo anual.	8
Figura N° 5: Descomposición del rendimiento por componentes en el cultivo de tomate	9
Figura N° 6: Niveles de rendimiento (potencial, alcanzable y real) y factores que afectan el rendimiento (determinantes, limitantes y reductores).	10
Figura N° 7: Absorción de N y K (kg ha-1) en función del rendimiento fresco de tomate (kg m-2).	19
Figura N° 8: Absorción de N,P y K por parte de planta entera de tomate y frutos, en función del rendimiento fresco.	19
Figura N° 9: Esquema del diseño experimental con los bloques y los tratamientos distribuidos al azar.	27
Figura N° 10: Cultivo luego de cosecha, donde se observan frutos de color verdes y virando a naranja que no se cosecharon.	29
Figura N° 11: Tensiómetro instalado en la parcela a 30 cm de profundidad.	30
Figura N° 12: Tanques de fertirriego con tuberías independientes para cada tratamiento.	31
Figura N° 13: Curva de absorción de N y K elaborada en base a Guzmán (2004).	32
Figura N° 14: División de las plantas en los diferentes órganos: hojas, tallos y frutos.	36
Figura N° 15: Acumulación de materia seca (parte aérea de la planta) según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.	38
Figura N° 16: Acumulación de materia seca en hoja según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.	39
Figura N° 17: Acumulación de materia seca en fruto según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.	40
Figura N° 18: Nitrógeno total absorbido por superficie según tratamiento de fertirriego.	42
Figura N° 19: Evolución del contenido total de nitrógeno según tratamiento.	43
Figura N° 20: Potasio total absorbido por superficie según tratamiento.	44
Figura N° 21: Evolución del contenido total de potasio según tratamiento.	45
Figura N° 22: Índice de cosecha promedio de los tres tratamientos para nitrógeno y potasio. ..	47

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1: Correlaciones de Spearman entre el rendimiento del cultivo, los componentes del rendimiento y las condiciones ambientales. -----	11
Cuadro N° 2: Nutrientes esenciales y formas en que son absorbidos por las plantas. -----	13
Cuadro N° 3: Absorción total de macronutrientes por tonelada de fruta fresca de tomate. -----	21
Cuadro N° 4: Extracción total de macronutrientes por tonelada de fruta fresca de tomate. -----	22
Cuadro N° 5: Temperatura media mensual, humedad relativa media mensual medidas dentro del invernadero y radiación incidente media mensual medida fuera del invernadero, durante el ciclo del cultivo. -----	25
Cuadro N° 6: Perfil de suelo tipo del ensayo. -----	25
Cuadro N° 7: Características físicas y químicas de la capa de suelo de 0-15 cm antes del transplante. Valores promedios de las parcelas. -----	26
Cuadro N° 8: Aporte de N y K en Kg ha ⁻¹ para los diferentes tratamientos. -----	26
Cuadro N° 9: Requerimientos teóricos para rendimiento de 20kg m ⁻² elaborado en base a Ciampitti y García (2007). -----	32
Cuadro N° 10: Características del agua de riego (muestra colectada en Enero 2020). -----	33
Cuadro N° 11: Estados fenológicos en cada muestreo de biomasa. -----	36
Cuadro N° 12: Numero de frutos, peso promedio de fruto, frutos no comercial y rendimiento. -----	40
Cuadro N° 13: Nitrógeno total absorbido según tratamiento. -----	41
Cuadro N° 14: Potasio total extraído según tratamiento. -----	43
Cuadro N° 15: Nitrógeno y potasio absorbido por etapa de cultivo, realizado en base al tratamiento con 100% requerimientos cubiertos. -----	46
Cuadro N° 16: Absorción de nutrientes por tonelada de fruta fresca cosechada según tratamiento. -----	47
Cuadro N° 17: Eficiencia de uso del nitrógeno y el potasio absorbido por gramo de fruta fresca según tratamiento. -----	48
Cuadro N° 18: Relación de absorción K/N. -----	48

1. INTRODUCCIÓN

El tomate es el cultivo que mayor área protegida ocupa en el país, con 470 ha según datos de zafra 2014/2015 (MGAP. DIEA, 2017) y es la segunda hortaliza en cuanto a ingreso al Mercado Modelo, con un ingreso de 19.875 ton en zafra 2018/2019 (UAM, 2019).

Los rendimientos del cultivo de tomate desde la temporada 2002-2003 a la temporada 2014-2015 no han aumentado, registrándose para esta última rendimientos de 98 Mg ha⁻¹ y 128 Mg ha⁻¹ para los cultivos protegidos de las zonas Sur y Norte respectivamente y 30 Mg ha⁻¹ en los cultivos a campo (MGAP. DIEA, 2017). Estos rendimientos son inferiores a los alcanzables en la región con similares recursos productivos y buen manejo, siendo la principal causa en la mayoría de los sistemas hortícolas, de los bajos ingresos económicos, poniendo en riesgo la sustentabilidad de los predios (Dogliotti et al., 2014). En el caso del tomate bajo invernáculo, el rendimiento es el principal factor responsable de la variabilidad de márgenes netos del cultivo, seguido de los precios de venta y la calidad del producto (categoría de tamaño) (Berrueta et al., 2020a).

Los principales factores limitantes del rendimiento alcanzable en la zona sur de Uruguay según Berrueta et al. (2019) para la zafra 2014/15/16 estuvieron relacionados con el manejo de la nutrición potásica en primer lugar y la nutrición nitrogenada en los cultivos de ciclo corto de primavera y verano. En este estudio se encontró que el 64% de los cultivos tenían un aporte total de potasio (K) por debajo de la demanda estimada basada en el rendimiento alcanzado y el 53% de los casos el K aplicado fue menos del 85% de la demanda estimada. En el caso del nitrógeno (N), se encontró que 54% de los cultivos tenían menos N aplicado que el requerido.

La mayor parte de los productores hortícolas realiza el manejo de la fertilización sin contar con suficiente información para tomar la decisión correcta con respecto a cuánto y cuándo fertilizar. Un adecuado suministro de potasio y nitrógeno depende de información ajustada sobre la cantidad total de potasio y nitrógeno absorbido y los momentos de absorción. Esto es de suma importancia para obtener altos rendimientos, además de disminuir la contaminación ambiental por lixiviación de nitrato y reducir costos económicos en fertilizante.

Sea cual sea la circunstancia o el cultivo del que se trate, contar con información sobre el consumo real que hacen los cultivos, constituye una herramienta sólida para argumentar técnicamente las recomendaciones de fertilización que se diseñan, ya que finalmente el ajuste preciso de un programa de fertilización se consigue con la generación de los datos específicos para la situación particular (Bertsch, 2009).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es contribuir a la mejora de la gestión del fertirriego en los predios aportando información sobre las curvas de absorción de Nitrógeno y Potasio (cantidades y momentos de absorción) para tomate indeterminado cultivado en primavera/verano bajo condiciones de invernadero en Uruguay.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de nitrógeno y potasio absorbidos en cada etapa fenológica del cultivo e identificar períodos de mayor demanda de nutrientes.
- Comparar la absorción de nitrógeno y potasio por unidad de materia seca y rendimiento fresco con distintos niveles de fertilización (deficiente, suficiente y excedentario).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 TOMATE EN URUGUAY

Según datos obtenidos en la encuesta hortícola el cultivo de tomate (*solanum lycopersicum*) ocupa 470 ha en Uruguay y es realizada en dos zonas principales de producción, en la zona sur; departamento de Canelones, Montevideo y San José, donde ocupa mayor área cubriendo 227 ha de cultivo a campo y 87 ha de cultivo protegido y en la zona norte; departamento de Salto y Artigas, donde la producción se realiza principalmente bajo cubierta ocupando 156 ha. Un total de 886 productores son los que realizan este cultivo, 213 de ellos en la zona norte y 673 en la zona sur.

Para la zafra 2018/2019 se estimó una producción de 34 mil toneladas según OPYPA (2019), la producción es destinada casi totalmente a consumo en fresco y comercializada en el mercado interno. La Unidad Agroalimentaria Metropolitana (antes en el Mercado Modelo de Montevideo) es el principal mercado mayorista donde pasa entre el 50 y 80 % de las hortalizas producidas en el país. De acuerdo a datos del anuario estadístico 2019 el ingreso de tomate al Mercado Modelo fue de 19.875 toneladas, ocupando el quinto lugar luego de papa, banana, naranja y manzana, representando el 5,9% del volumen total. En cuanto al monto económico bruto de comercialización en el mercado el tomate representó el 9,4% (U\$S 26.356.498) y ocupó el tercer lugar luego de banana y papa (UAM, 2019).

Como se muestra en la Figura 1 este producto ingresa al mercado durante todo el año. Esto se debe a la complementariedad de las dos zonas de producción; la zona norte se basa en producción a contraestación logrando ingresar al mercado en otoño, invierno y primavera; mientras que la zona sur se especializa en la producción de estación ingresando al mercado en primavera, verano y otoño. La oferta es menor en los meses de invierno (junio – agosto) mientras que la oferta máxima ocurre de noviembre a enero. El precio oscila durante todo el año y es determinado por la relación oferta/demanda, ocurriendo los mayores precios en marzo y luego desde agosto a octubre (Figura 1).

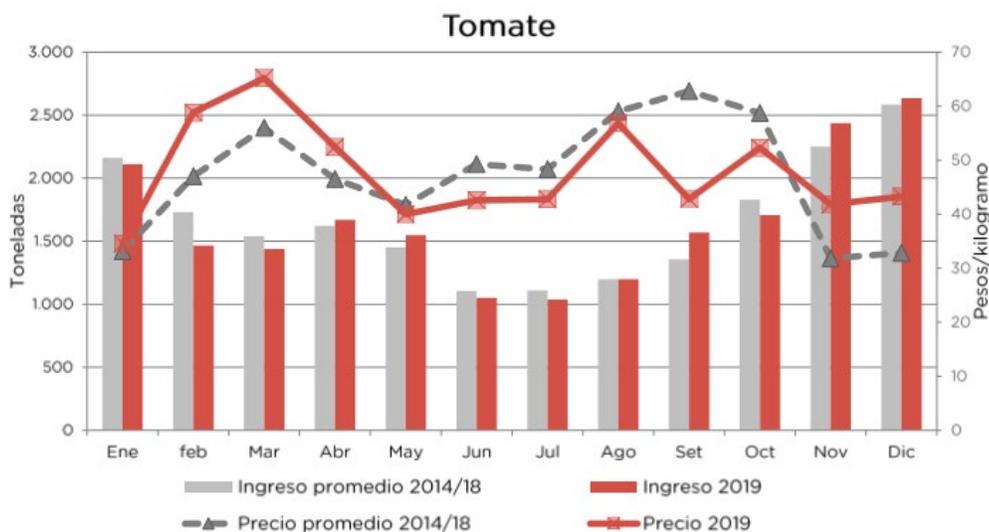


Figura N° 1: Precio e ingreso de tomate al Mercado Modelo (2019)
Fuente: tomado de UAM (2019).

2.2 EL CULTIVO DE TOMATE

2.2.1 Taxonomía

Taylor (1986) señala que el tomate pertenece a la familia Solanaceae (también conocida como familia de las solanáceas), género *Lycopersicon*, subfamilia Solanoideae y tribu Solanaeae. La clasificación taxonómica del tomate ha sido objeto de debate por mucho tiempo. En 1753 el botánico sueco Linnaeus lo llamó *Solanum lycopersicon*, pero 15 años más tarde Philip Miller reemplazó el nombre por *Lycopersicon esculentum*. Aunque los taxónomos han reintroducido recientemente su nombre original, *Solanum lycopersicon* (Heiser y Anderson, 1999).

Sims (1980) indican que todas las especies silvestres de tomate relacionadas son nativas de la región andina que incluye partes de Chile, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú. Aunque la forma ancestral del tomate creciera en la región andina, la primera domesticación extensiva parece haber ocurrido en México.

El tomate cultivado alcanzó su forma actual y su lugar en la dieta humana después de un largo período de domesticación. El desarrollo inicial probablemente se debió, en

parte, a la selección de genotipos preferidos en el germoplasma existente (Lindhout, 2005).

2.2.2 Características botánicas

El sistema radicular del tomate está constituido por la raíz principal, las secundarias y las adventicias. Las raíces adventicias se desarrollan principalmente a partir de la base del tallo en condiciones favorables. Cuando la planta se desarrolla a partir de semilla, sin trasplante, se forma una vigorosa raíz principal que puede llegar a penetrar más de tres metros en terrenos aluviales profundos. Cuando las plántulas se trasplantan la raíz principal se daña y se forma un sistema de raíces laterales secundarias, de rápido desarrollo que puede extenderse superficialmente sobre un diámetro de 1,5 m y alcanzar más de 0,5 m de profundidad (Nuez, 1995). Generalmente el 70% de las raíces se localizan a menos de 20 cm de profundidad. Todas las raíces absorben agua, pero los minerales son absorbidos por las raíces más próximas a la superficie (Varga y Bruinsma, citados por Nuez, 1995).

El tallo típico tiene de 2-4 cm de diámetro en la base y está cubierto de pelos glandulares y no glandulares que salen de la epidermis. En el período inicial forma de 6 a 12 hojas que crecen lateralmente con una filotaxia 2/5, antes de que la yema principal se transforme en una inflorescencia (Nuez, 1995).

El hábito de crecimiento del cultivo de tomate varía entre dos tipos principales llamados “indeterminados” y “determinados”. Sin embargo, del punto de vista botánico ambos tipos son determinados, ya que la yema apical siempre se diferencia en una inflorescencia terminal. En plantas de hábito “indeterminados” la yema de la axila de la hoja más joven es la que continúa el crecimiento e inhibe la brotación de otras yemas axilares (al menos por un período). Esta yema crece y mueve a la hoja más joven a una posición por encima de la inflorescencia la cual es desplazada hacia el costado, dando la apariencia de un crecimiento continuo del tallo principal. Luego de diferenciadas 3 o 4 hojas, esta yema se transforma en una segunda inflorescencia terminal. Esta secuencia de crecimiento y desarrollo se repite indefinidamente durante todo el ciclo de la planta de hábito “indeterminados” (a la fracción de tallo que incluye 3 o 4 hojas y un racimo se le llama “simpodio” (Figura 2)). En las plantas de tipo “determinado” hay una fuerte brotación de yemas axilares y se producen menor número de hojas por simpodio, dando lugar al típico hábito arbustivo de estos cultivares (Atherton y Rudich, citados por Dogliotti y Colnago, 2017).

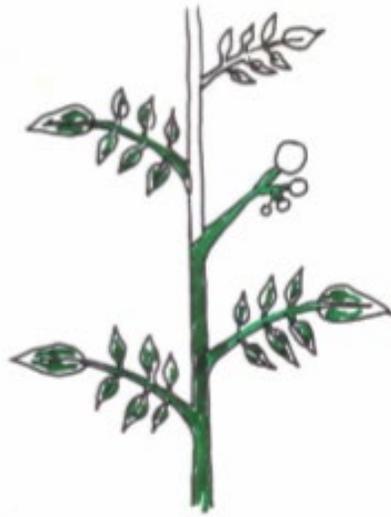


Figura N° 2: Unidad de crecimiento en la planta de tomate (“simpodio”)
Fuente: adaptado de Dogliotti y Colnago (2017).

Las hojas de tomate son pinnado compuestas, una hoja típica mide unos 0,5 m de largo y algo menos de ancho, con hasta 8 foliolos laterales de gran tamaño y un foliolo terminal de igual tamaño (Figura 3). Generalmente los foliolos son peciolados y lobulados irregularmente con borde dentado. Las hojas están cubiertas de pelos al igual que el tallo y se encuentra en la epidermis del envés contiene abundantes estomas que facilita el intercambio gaseoso (Nuez, 1995).

La flor de tomate es perfecta, regular e hipógina y consta de 5 o más sépalos, de 5 o más pétalos dispuestos de forma helicoidal a intervalos de 135° , de un número igual de estambres que se alternan con los pétalos y de un ovario bilocular o plurilocular (Figura 3). Las flores se agrupan en inflorescencias de tipo racimos. El fruto de tomate es una baya bilocular o plurilocular que se desarrolla a partir de un ovario de unos 5-10 mg y alcanza un peso final que oscila entre los 5 y los 500g (Nuez, 1995).



Figura N° 3: Hoja y flor de la planta de tomate.
Fuente: adaptado de López (2017).

2.2.3 Formación del rendimiento

Dogliotti y Colnago (2017) realizan un análisis de formación del rendimiento en el cultivo de tomate basándose en el modelo citado por Lovenstein et al. (1993) (Figura 4). De acuerdo con este modelo, la fijación de CO_2 del aire en un día determinado (Asimilación Bruta) depende de la tasa fotosintética (TAB), la cual a su vez depende de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y de la eficiencia con que se usa esa radiación en el proceso de fotosíntesis. La cantidad de radiación interceptada depende del IAF y la arquitectura foliar del cultivo, y de la cantidad de radiación incidente. La eficiencia con que se usa esa radiación depende de la temperatura, disponibilidad de agua y CO_2 , estado nutricional del cultivo y edad promedio del follaje.

El CO_2 fijado es transformado en azúcares simples y estas son utilizadas por las plantas, en parte, para el mantenimiento de las funciones metabólicas y de las estructuras celulares. Este gasto de energía o pérdida de CO_2 se llama Respiración de mantenimiento. La cantidad de azúcares simples remanente luego del gasto en respiración de mantenimiento la llamamos Asimilación Neta y es lo que el cultivo puede usar para la producción de nuevas estructuras vegetales o para el almacenamiento de reservas, o sea para el crecimiento (Dogliotti y Colnago, 2017).

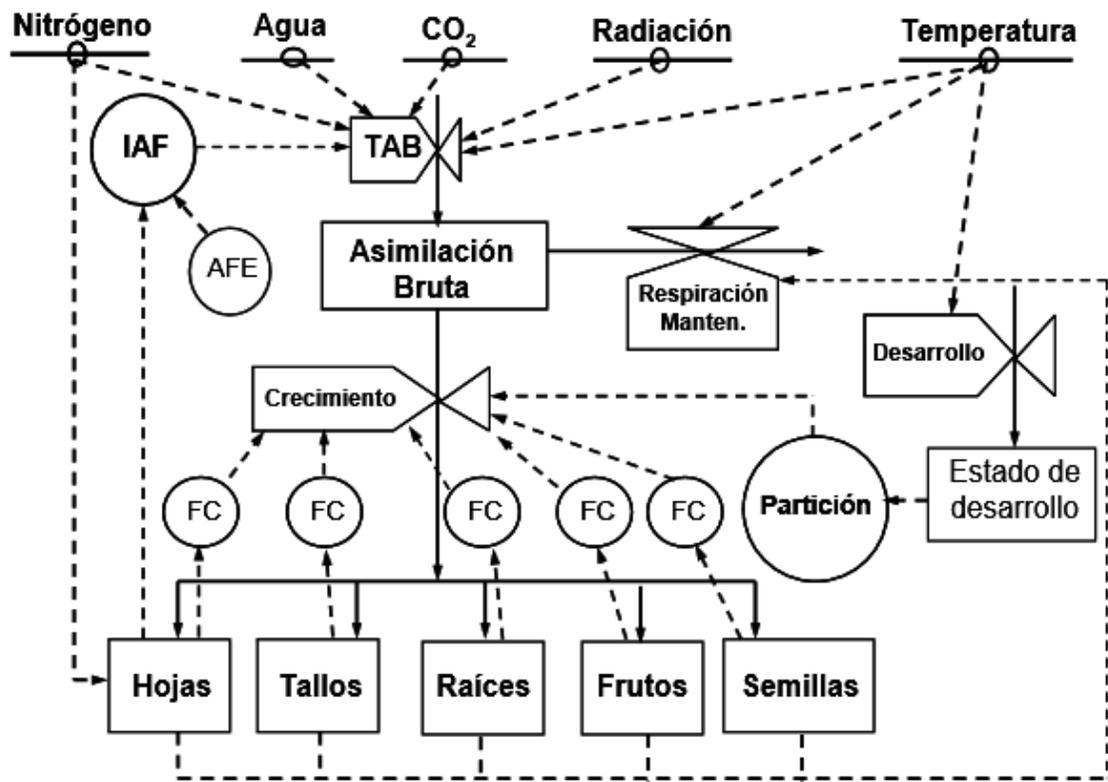


Figura N° 4: Modelo cualitativo de la formación de rendimiento de un cultivo anual.
Fuente: adaptado de Dogliotti y Colnago (2017).

A los asimilados disponibles para el crecimiento (Asimilación Neta) se los llama también “fuente” y a los distintos órganos que requieren de estos asimilados se los llama “fosa”. La forma en que la fuente se distribuye en las fosas (partición) varía a lo largo del ciclo fenológico del cultivo, es decir que la partición depende del estado de desarrollo del cultivo. Los azúcares simples son transformado en componentes estructurales o de reserva en cada fosa con una determinada eficiencia representado en la figura como FC (factor de conversión), que varía dependiendo el componente final al que debe transformarse ese azúcar simple. Por ende, cada órgano tendrá diferente FC dependiendo de la composición química del mismo (Dogliotti y Colnago, 2017).

De acuerdo con Heuvelink y Dorais (2005) el rendimiento de un cultivo de tomate está determinado por la producción total de biomasa, el reparto de la biomasa y el contenido de materia seca de la fruta. Además de afectar la cantidad de la cosecha, estos atributos también influyen en la calidad del producto (el tamaño y el sabor de la fruta) y por lo tanto en el precio del producto.

La alta producción de biomasa es condición necesaria pero no suficiente para lograr altos rendimientos. El reparto de biomasa puede ejemplificarse en la figura N°4 donde se muestra que existe una relación entre los asimilados destinados a órganos vegetativos y los destinados a órganos reproductivos. Si aumentamos la partición de asimilados a los frutos y disminuimos los asimilados destinados a las hojas a un nivel menor al requerido para reponer el área foliar que va senesciendo, ocasionaremos una disminución en el IAF futuro y por ende una disminución en asimilación bruta, pudiendo provocar reducción del rendimiento y hasta fin del cultivo en casos extremos (Dogliotti y Colnago, 2017).

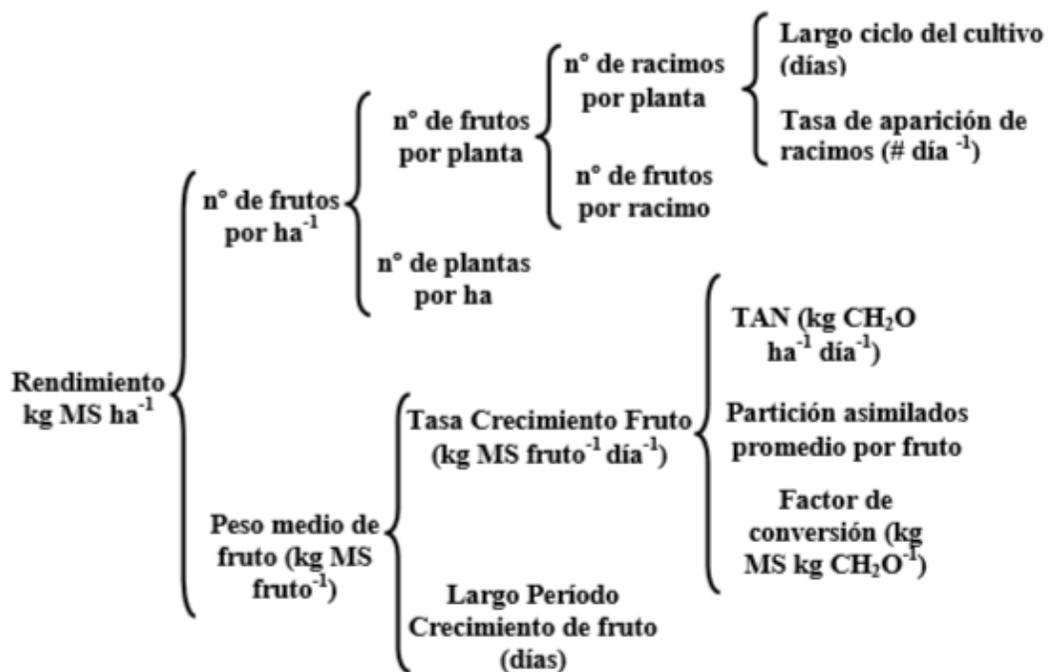


Figura N° 5: Descomposición del rendimiento por componentes en el cultivo de tomate (TAN: Tasa de asimilación neta).

Fuente: adaptado de Dogliotti y Colnago (2017).

En la figura 5 se puede observar una descripción de los componentes de rendimiento en el cultivo de tomate. Algunos de estos componentes están directamente determinados por decisiones de manejo como la densidad de plantación y el largo del ciclo del cultivo. Otros están determinados por la temperatura media como la tasa de aparición de racimos y el largo del período de crecimiento del fruto. La relación Fuente/Fosa determina el número de frutos que cuajan por racimo. El número de frutos por planta y la temperatura influyen en la partición de asimilados promedio al fruto (Dogliotti y Colnago, 2017).

2.2.4 Factores determinantes del rendimiento

Los factores que afectan el rendimiento en los cultivos pueden dividirse en tres niveles (determinantes, limitantes y reductores), determinando diferentes situaciones productivas o niveles de rendimiento según su incidencia (Van Ittersum y Rabbinge, 1997) (Figura 6).

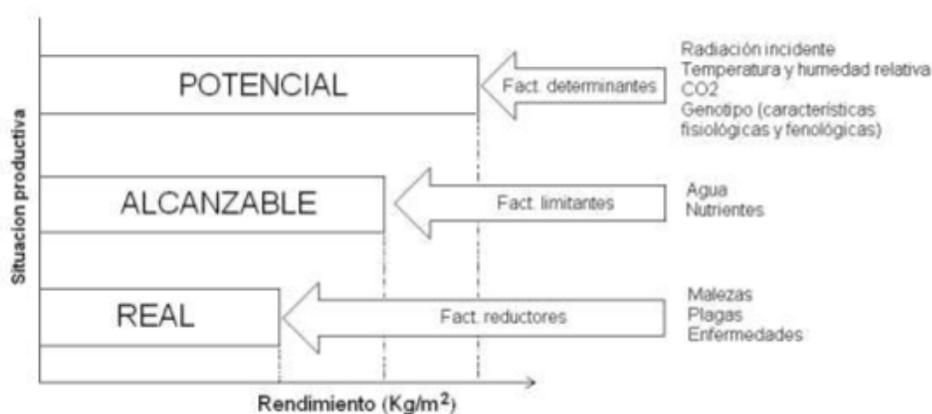


Figura N° 6: Niveles de rendimiento (potencial, alcanzable y real) y factores que afectan el rendimiento (determinantes, limitantes y reductores).

Fuente: adaptado de Van Ittersum y Rabbinge (1997)

El rendimiento potencial es el rendimiento de un cultivar actual con un suministro ilimitado de nutrientes y agua, y con plagas, enfermedades, malezas y otros factores de estrés controlados eficazmente (Evans y Fischer 1999, Van Ittersum y Rabbinge, 1997). Los factores que influyen son la radiación solar potencial, la concentración de CO₂ atmosférico, la temperatura y el genotipo (Evans y Fischer, 1999, Van Ittersum et al., 2013). Estos factores ambientales son variables a lo largo del año, por lo tanto, el potencial de rendimiento dependerá no solo del lugar sino también de las fechas de siembra y cosecha (Lobell et al., 2009).

De acuerdo con Fischer y Edmeades (2010) el rendimiento alcanzable es el mejor rendimiento logrado mediante el uso hábil de la mejor tecnología disponible, teniendo en cuenta los riesgos de producción y la economía. El rendimiento alcanzable es limitado por la disponibilidad de agua y nutrientes, y sus manejos asociados. Esto último refiere a momentos y dosis de aporte de los nutrientes minerales y la calidad del suelo en términos de características químicas (pH, conductividad eléctrica, contenido de nutrientes, el contenido de materia orgánica). En relación al manejo del riego (balance hídrico de cultivo), fertirriego y la calidad del suelo en términos de características físicas (estructura,

profundidad y textura del horizonte A) e hidrológicas (capacidad de almacenar agua) (Heuvelink y Dorais, 2005).

Según FAO y DWFI, citados por Berrueta et al. (2020a), el rendimiento real refleja el estado actual de los suelos y el clima, las habilidades promedio de los agricultores y su uso promedio de la tecnología. Este está determinado por factores reductores como lo son la ocurrencia de enfermedades, presencia de plagas y malezas.

Cuadro N° 1: Correlaciones de Spearman entre el rendimiento del cultivo, los componentes del rendimiento y las condiciones ambientales.

Componentes de rendimiento o condiciones ambientales	Coefficiente	p-valor
Número de frutos por planta	0,74	<0,0001
Número de flores por planta	0,69	<0,0001
Número de cerchas por planta	0,72	<0,0001
Diámetro del fruto (mm)	0,20	0,0344
Duración del período de crecimiento (días)	0,61	<0,0001
PAR diario interceptado* (MJ m⁻² d⁻¹)	0,43	0,0001
PAR acumulado interceptado* (MJ m⁻²)	0,80	<0,0001
Fracción de PAR interceptado** (%)	0,38	0,0001
Densidad del tallo en la fecha del trasplante por m⁻²	0,01	0,9377
Plantas marchitas al final de la cosecha (%)	-0,02	0,8078
Temperatura media media (° C)	0,31	0,0008
Temperatura mínima media (° C)	0,36	0,0001
Temperatura máxima media (° C)	0,26	0,0054
Humedad relativa media (%)	-0,25	0,0100

* PAR (Radiación fotosintéticamente activa) diario y acumulativo interceptado con transmisividades de invernadero medidas.

** Fracción de PAR (Radiación fotosintéticamente activa) interceptada al inicio de la cosecha.

Fuente: adaptado de Berrueta et al. (2020a).

Berrueta et al. (2020a) obtuvo en un estudio sobre 110 invernáculos en la región sur de Uruguay durante 2014-2016, un rendimiento promedio para el cultivo de tomate de 10,9 kg m⁻² y la brecha de rendimiento respecto al rendimiento potencial fue de 44%. En este estudio se encontró que el PAR (Radiación fotosintéticamente activa) acumulado interceptado fue la variable más alta y positivamente correlacionada con el rendimiento, el número de frutos, flores, racimos por planta y el tamaño del fruto también se correlacionaron positivamente con el rendimiento. En cuanto a factores ambientales, el

rendimiento se correlacionó positivamente con la temperatura y negativamente con la humedad relativa (Cuadro 1).

Según Berrueta et al. (2019) la brecha de rendimiento para el cultivo de tomate en la región sur del país tomando como referencia el rendimiento alcanzable (rendimiento máximo alcanzado por los productores para cada valor de PAR interceptado acumulado) se encuentra en 34% del rendimiento alcanzable. Además, afirma que existe una amplia variabilidad en los rendimientos para un nivel dado de PAR interceptado acumulado, que se explica por factores limitantes y reductores del crecimiento. Para determinar las variables que afectan el rendimiento los cultivos fueron clasificados en tres grupos según el PAR interceptado acumulado (nivel bajo (L), medio (M) y alto (H) de PAR interceptado). Como resultado se encontró que la nutrición con potasio (K) fue el primer factor limitante del rendimiento que explica las diferencias relativas en las brechas de rendimiento entre los cultivos en todos los grupos. De un total de 110 cultivos el 64% tenían un aporte total de potasio por debajo de la demanda estimada del cultivo basada en el rendimiento alcanzado y en el 53% de las ocasiones se aplicó menos del 85% de la demanda estimada de K. En el 40% de los cultivos se aportó más del 50% de K antes del trasplante y el resto se aplicó mediante fertirrigación durante el crecimiento del cultivo. En cuanto al nitrógeno (N) se observó que el aporte por fertirrigación explicó las diferencias en la brecha de rendimiento en el grupo M. Considerando la absorción total de N del tomate, se encontró que 54% de los cultivos tenían menos N aplicado que el requerido según el rendimiento obtenido.

2.3 DINÁMICA DE NUTRIENTES EN LA PLANTA

Las plantas son capaces de sintetizar mediante el proceso de fotosíntesis, todos los compuestos orgánicos necesarios para su vida, por lo tanto, solo necesitan compuestos inorgánicos para cubrir sus necesidades nutricionales. En total 16 elementos inorgánicos son considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal, más de la mitad de estos elementos son requeridos en gran cantidad y se los conoce como macronutrientes (Cuadro 2) (Gianquinto et al. 2013).

Cuadro N° 2: Nutrientes esenciales y formas en que son absorbidos por las plantas.

Macronutriente	Forma química	Micronutriente	Forma química
Carbono (C)	CO ₂	Hierro (Fe)	Fe ²⁺
Oxígeno	H ₂ O	Manganeso (Mn)	Mn ²⁺
Hidrógeno	H ₂ O	Zinc (Zn)	Zn ²⁺
Nitrógeno (N)	NO ³⁻ , NH ⁴⁺	Cobre (Cu)	Cu ²⁺
Fósforo (P)	H ₂ PO ₄ , HPO ₄ ²⁻	Boro (B)	H ₃ BO ₃
Azufre (S)	SO ₄ ²⁻	Molibdeno (Mo)	MoO ₄ ²⁻
Potasio (K)	K ⁺	Cloro (Cl)	Cl ⁻
Calcio (Ca)	Ca ²⁺		
Magnesio (Mg)	Mg ²⁺		

Fuente: adaptado de Gianquinto et al. (2013).

De los nueve macronutrientes vegetales, el C se obtiene del aire en forma de CO₂, mientras que el H y el O₂ los obtiene del agua. En la mayoría de los casos, hay cantidades mayores de Ca, Mg y S (en forma de sulfatos) en el suelo y el agua de riego. Con respecto a los siete micronutrientes vegetales, estos están presentes en cantidades suficientes en la mayoría de los suelos cultivables, pero su disponibilidad para los cultivos depende de las propiedades del suelo, especialmente del pH (Gianquinto et al., 2013).

2.3.1 Nitrógeno

El nitrógeno (N) es esencial para todos los procesos de la vida en las plantas, es un componente estructural de todas las proteínas, incluidas las enzimas, que participan en todas las reacciones químicas que en conjunto constituyen los procesos de crecimiento y desarrollo. Además, el N es un componente importante de los ácidos nucleicos (ADN, ARN) y es una parte central de la clorofila. Está presente en alcaloides vegetales, en algunas vitaminas del complejo B, y en muchas otras sustancias (Gianquinto et al., 2013).

En buenas condiciones de crecimiento (alta temperaturas y radiación), el nitrógeno debe ser adecuado para que las plantas crezcan rápidamente, pero los niveles altos de nitrógeno fomentan el crecimiento vegetativo, que puede ser perjudicial para el crecimiento reproductivo con radiación limitada (Peet, 2005). Según OMAFRA, citado por Peet (2005) una cantidad excesiva de nitrógeno en condiciones de poca luz al comienzo del ciclo de producción da como resultado una planta demasiado vegetativa propensa a enfermedades y un desarrollo deficiente de la flor, cuajado y tamaño.

La deficiencia de nitrógeno puede aparecer en suelos anegados (arcilla pesada) o suelos arenosos (después de una lixiviación intensa) o puede ser inducida por aplicaciones intensas de paja u otro material orgánico con una alta relación C: N. (Peet, 2005). La deficiencia de nitrógeno a veces es difícil de detectar sin un control bien fertilizado para comparar. El crecimiento puede reducirse en general, por lo que las plantas se atrofian, pero las hojas pueden verse saludables, excepto por ser de un verde más pálido de lo normal. Los síntomas aparecen primero en las hojas inferiores y continúan siendo más pronunciados allí, ya que el nitrógeno es un elemento móvil, que pasa de los tejidos más viejos a los más jóvenes. Los síntomas en la parte superior de la planta incluyen flores que son pálidas en lugar de amarillo intenso y un tallo principal delgado, toda la planta tiene un aspecto delgado. En lugar de que el follaje sea exuberante o suculento, las hojas son pequeñas, erectas y "duras". Con el tiempo, toda la planta puede volverse amarilla, las flores caen y la fruta permanece pequeña. Las plantas pueden madurar temprano, pero el rendimiento y la calidad de la fruta disminuyen (Peet, 2005).

En el caso de ocurrir exceso de nitrógeno, las hojas toman color verde oscuro, a veces engrosadas y quebradizas. En la parte superior de la planta, los tallos permanecen gruesos y las hojas nuevas se pueden enrollar en una bola. Los racimos y las flores son grandes, pero el cuajado puede ser pobre. Aunque inicialmente se promueve el crecimiento de las hojas, eventualmente se restringe bajo un exceso de nitrógeno. Las plantas pueden ser más susceptibles a enfermedades e insectos (Jones, 1999). La forma de nitrógeno también es una consideración importante para protegerse contra la toxicidad del nitrógeno. Los tomates son mucho más sensibles al nitrógeno en forma de amonio que en forma de nitrato, especialmente con poca luz. Los primeros síntomas de la toxicidad del

amonio son pequeñas manchas cloróticas en las hojas, que luego se vuelven necróticas (marrones y muertas). El tamaño de la mancha puede aumentar, cubriendo toda el área intervenal, dando a la hoja una apariencia quemada y los márgenes de la hoja pueden enrollarse. También pueden producirse lesiones en los tallos. A medida que la planta madura, el tejido vascular en la base de las plantas comienza a deteriorarse, y el marchitamiento ocurre durante períodos de alta demanda atmosférica, seguido de la muerte de la planta (Jones, 1999).

2.3.2 Potasio

El potasio tiene muchas funciones reguladoras importantes en el desarrollo de las plantas: síntesis de lignina y celulosa (utilizadas para la formación de componentes estructurales celulares), regulación de la fotosíntesis y producción de azúcares vegetales. Controla la pérdida de agua de las plantas y participa en la sanidad general, contribuye como catión principal a la turgencia celular y a la compensación electroquímica de aniones orgánicos en las células vegetales. También participa como cofactor o agente estimulante en más de 50 sistemas enzimáticos (Gianquinto et al., 2013).

Se requiere potasio para la mejor calidad de la fruta y para regular el crecimiento, como el nutriente principal con carga positiva, el potasio equilibra las cargas negativas de los ácidos orgánicos producidos dentro de la célula y las de los aniones como sulfatos, cloruros y nitratos. Los niveles de potasio son particularmente importantes en el trasplante, para controlar el crecimiento posterior de la planta y prevenir trastornos de maduración (Peet, 2005).

Los aumentos de rendimiento con las adiciones de potasio son mayores cuando el nitrógeno no es un factor limitante. La deficiencia de potasio se expresa primero como follaje de color verde oscuro, que luego se vuelve marrón violáceo. La clorosis y la necrosis marginal aparecen primero en las hojas más bajas y luego progresan hacia arriba. Como el nitrógeno y el fósforo, el potasio es móvil en floema y las hojas jóvenes son las últimas afectadas. La clorosis casi siempre ocurre primero en los márgenes de las hojas más viejas, que a menudo se curvan hacia abajo. Más tarde, la clorosis se desplaza hacia las áreas internervales hacia el centro de la hoja, y sigue la necrosis de los márgenes de las hojas (Peet, 2005).

En etapas avanzadas, las nervaduras pequeñas pierden su color, las hojas más viejas se queman severamente y se caen, las hojas jóvenes se vuelven amarillas y permanecen pequeñas, el crecimiento de las plantas está restringido y la maduración de la fruta es desigual. La calidad poscosecha también es mala (Jones, 1999).

La clorosis internerval también es sintomática de niveles bajos de magnesio, y las dos deficiencias a veces se confunden. En comparación con la deficiencia de magnesio, es más probable que la deficiencia de potasio ocurra a lo largo de los márgenes de las hojas y también es más probable que se convierta en manchas necróticas. Los problemas con la calidad de la fruta, como la maduración con manchas, la fruta en forma de caja e incluso hasta cierto punto el color, están asociados con niveles bajos de potasio y, en la mayoría de los casos, pueden contrarrestarse con fertilizantes con alto contenido de potasio (OMAFRA, citado por Peet, 2005). La absorción de potasio también se puede reducir en condiciones de enraizamiento anaeróbico y temperaturas bajas en la zona de las raíces (Peet, 2005).

La toxicidad por potasio per se es rara. Sin embargo, tasas muy altas de potasio pueden inducir deficiencia de Ca o Mg o daño por salinidad. La deficiencia de calcio puede provocar podredumbre apical del fruto. Las reducciones en el rendimiento ocurren a niveles muy altos de K, cuando la relación K: N en la alimentación líquida es demasiado alta, o cuando tanto N como K son demasiado altos. En este caso, las reducciones de rendimiento se atribuyen al aumento de la salinidad en el medio de crecimiento. Los altos niveles de potasio mejoran la forma de la fruta, disminuyen el tamaño de la fruta y reducen la proporción de fruta hueca (un trastorno asociado con el crecimiento temprano en condiciones de poca luz) incluso en condiciones en las que los rendimientos totales son algo reducidos (Peet, 2005).

2.3.3 Relación Potasio/Nitrógeno

La proporción entre potasio y nitrógenos es de gran importancia para el desarrollo de las plantas. Cuando la proporción es baja, es decir que se suministra más N la tasa de crecimiento es alta. El nitrógeno es el elemento que más controla la tasa de crecimiento de la planta (en ausencia de otros factores limitantes). Cuanto mayor es la proporción, más lento es el crecimiento. Por otro lado, el bajo nivel de potasio durante las épocas de alta carga de frutas reduce la calidad del tomate, especialmente el sabor (Peet, 2005).

La proporción óptima de potasio y nitrógeno varía con la etapa de crecimiento. Cuando la primera racimo está en flor, la relación K: N debe ser 1.2/1 esta proporción aumenta a medida que aumenta la carga de fruta en la planta, ya que aproximadamente el 70% del potasio absorbido pasa a la fruta. Para cuando se abran las flores del noveno racimo, la proporción debería ser de 2,5/1 (Peet, 2005).

2.4 FUENTES DE NUTRIENTES

2.4.1 Nitrógeno

Los minerales del suelo no contienen N o su contenido es insignificante. Por lo tanto, a diferencia de otros nutrientes de las plantas, el N no está disponible para la planta a través de la meteorización de las partículas inorgánicas del suelo. La atmósfera terrestre es el principal depósito de N (el aire es un 78% de gas N₂), el N atmosférico está disponible para la planta mediante la fijación, este puede ser fijado por bacterias específicas y por reacción con oxígeno a altas temperaturas (durante tormentas eléctricas, en procesos de combustión y por oxidación por luz solar). En la producción de fertilizantes se obtiene combinando nitrógeno atmosférico e hidrógeno (Gianquinto et al., 2013).

La materia orgánica del suelo (MOS) también es una fuente importante de N (más del 90% del N del suelo está asociado con MOS), una pequeña cantidad de MOS se mineraliza cada año (Gianquinto et al., 2013). La mineralización neta de N, así como su tasa de mineralización, dependen, tanto de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, como de la composición y las condiciones ambientales donde se desarrolla el proceso (Monsalve et al., 2017). Cuanto más alta es la temperatura, más rápidamente ocurre la mineralización, y en los invernaderos (con riego frecuente y altas temperaturas), la mineralización de MOS se acelera, aumentando la disponibilidad de N pero causando un agotamiento más rápido del N orgánico del suelo (Gianquinto et al., 2013).

De acuerdo con Gianquinto et al. (2013), otras fuentes importantes de N son estiércol animal y compost. El estiércol animal es una fuente potencialmente importante de N, la cantidad de N suministrada por el estiércol varía según el tipo de ganado (especie, edad y dieta), manipulación (por ejemplo, materiales de cama), tasa de aplicación y método de aplicación. Aproximadamente la mitad de este nitrógeno se convierte con relativa rapidez (algunos meses) en formas disponibles para las plantas, las cantidades menores se convierten gradualmente durante un período más largo. El compost generalmente proporciona menos N mineral que los residuos de cultivos y los abonos, durante el proceso de compostaje el material fresco que se degrada fácilmente se descompone. Parte del N se volatiliza y la materia orgánica que queda es relativamente resistente a la mineralización, de igual manera la aplicación de compost año tras año mejora indirectamente el suministro de nitrógeno orgánico al aumentar el contenido de humus del suelo.

2.4.2 Potasio

El potasio es un elemento común en la naturaleza y constituye aproximadamente el 2,3% de la corteza terrestre. Los minerales arcillosos son la principal fuente de K del suelo, pero gran proporción está presente como parte de partículas minerales insolubles e inaccesibles para las plantas. Las plantas usan solo K intercambiable ubicado en la superficie de las partículas del suelo o el K disuelto en la solución del suelo, que a menudo asciende a menos de 100 mg/kg^{-1} de suelo (Gianquinto et al., 2013).

Según Gianquinto et al. (2013), las fuentes de K en el suelo pueden clasificarse de acuerdo a su disponibilidad para las plantas como:

- Potasio no disponible; está contenido dentro de la estructura cristalina de micas, feldspatos y minerales arcillosos, las plantas no pueden usar K en estas formas insolubles. Durante períodos prolongados, estos minerales se descomponen liberando K como ion (K^+), este proceso es demasiado lento para satisfacer las necesidades de los cultivos de invernadero.
- Potasio lentamente disponible o potasio fijo; está atrapado entre las capas de ciertos tipos de minerales arcillosos; las plantas no pueden usar mucho de este K en una sola temporada de crecimiento. Sin embargo, el suministro de K fijo determina en gran medida la capacidad del suelo para suministrar K durante períodos prolongados.
- Potasio fácilmente disponible o potasio intercambiable; se disuelve en el agua del suelo o se mantiene en la superficie de las partículas de arcilla. A medida que las plantas absorben K^+ de la solución del suelo y disminuye la concentración de K en la solución del suelo, se repone a partir de la fracción intercambiable adsorbida en las superficies minerales y se restablece el equilibrio.

2.5 ABSORCIÓN DE NUTRIENTES

Sonneveld y Voogt (2009) afirman que existe una relación lineal entre el rendimiento y la absorción de nutrientes. Esto se puede observar en la figura 7 donde se muestra la correlación positiva existente entre el rendimiento y la adsorción de N y K.

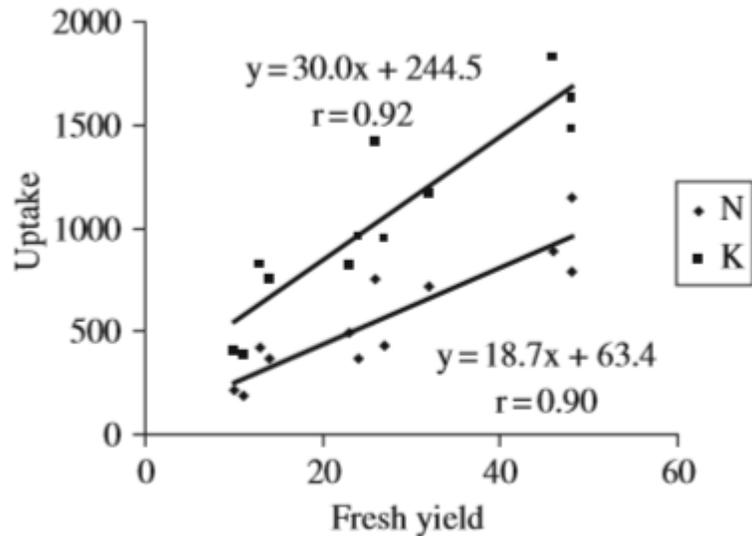


Figura N° 7: Absorción de N y K (kg ha⁻¹) en función del rendimiento fresco de tomate (kg m⁻²).

Fuente: adaptado de Sonneveld y Voogt (2009).

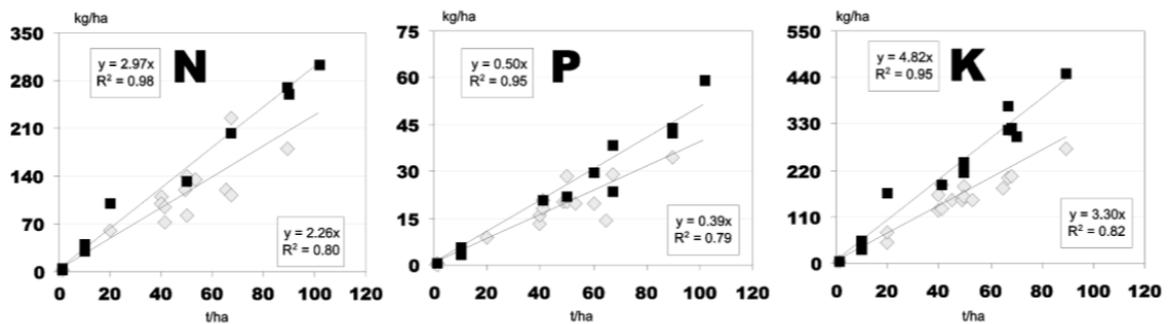


Figura N° 8: Absorción de N,P y K por parte de planta entera de tomate y frutos, en función del rendimiento fresco.

Fuente: adaptado de Bertsch (2009).

Bertsch (2009) también indica la existencia de una correlación positiva entre la absorción de nutrientes como N, P y K con el rendimiento obtenido. En la figura 8 se puede observar una alta correlación entre el rendimiento y la absorción de nutrientes (cuadrados negros) y también una alta correlación encontrada entre rendimiento y nutrientes absorbidos por fruto (rombos grises).

Marschner (1997), mostró un modelo general interesante para la absorción de macro nutrientes en relación con la concentración externa. Se supone que K, P, N y S se adsorben en cantidades relativamente altas a bajas concentraciones externas y la adsorción de Na, Mg y Ca son mucho más dependientes de la concentración externa. Voogt y Sonneveld (1997), afirman que, en relación a la absorción, los nutrientes como Ca y Mg deberían encontrarse en concentraciones mucho más altas en la solución de suelo respecto a nutrientes como K.

Sonneveld y Voogt (2009) indican que, a pesar de una alta concentración externa de un macronutriente principal, muchas plantas pueden sobrevivir con una restricción relativamente fuerte de la absorción de dicho elemento (como por ejemplo Na). Esto se comprobó por Sonneveld y Van den Ende, citados por Sonneveld y Voogt (2009), mediante aplicación de cloruros de Na, K, Ca y Mg a cultivo de tomate y crisantemo, logrando aumentar la concentración en solución externa de 5 a 10 veces en el caso de K y de 3 a 5 veces en el caso de Na, Ca y Mg. Sin embargo, los fuertes aumentos en concentración externa solo se reflejan parcialmente logrando pequeños aumentos concentración interna. Por otro lado, se observó que al suministrar en alto niveles K, Ca y Mg aumentan la absorción de estos elementos y se reducen la absorción de otros cationes, mientras que el Na reduce la absorción de K en el caso del cultivo de tomate. Este trabajo demostró que la suma de cationes absorbidos por los cultivos mantiene más o menos constante, en el caso del tomate se mantiene un promedio de 4550 (mmol kg⁻¹ de materia seca).

Sonneveld (1997), indica que la eficiencia mediante la cual el cultivo utiliza los nutrientes minerales aumenta junto a la productividad, concluyendo que en un régimen de bajo rendimiento de aproximadamente 10 kg de frutas m⁻², se absorben 2.50 g de N por kg de fruta producida, mientras que con una producción promedio de 50 kg m⁻² se absorbe solo 2.00 g de N por kg de fruta producida.

2.6 REQUERIMIENTO DE NUTRIENTES

El propósito de cualquier programa de nutrición mineral en tomate es suministrar los elementos o compuestos minerales que son absorbidos por la planta en la dosis, forma, lugar y momento oportunos, para optimizar su utilización por el cultivo. La necesidad de agregar vía fertilización algunos de los elementos minerales esenciales surgen del balance insuficiente entre lo que la planta requiere y lo que el suelo suministra. Este déficit nutricional se acentúa en casos en que los nutrientes son poco móviles y no logra llegar al sitio estratégico de acción tales como hojas, flores o frutos cuajados (Martínez et al., 2017).

La estrategia recomendada para el cálculo de fertilización del tomate se basa fundamentalmente en conocer la extracción de nutrientes por parte de la fruta y lo requerido para el crecimiento de la biomasa vegetativa. Un adecuado programa de manejo nutricional sólo se puede hacer cuando hay una comprensión clara del rol de todos los nutrientes. En consecuencia, por estar el crecimiento de los cultivos estrechamente vinculado a una adecuada nutrición mineral, el conocimiento de la extracción que realiza la planta de estos elementos en el suelo, se convierte en una información básica para el diseño y planificación de la fertilización de los cultivos (Martínez et al., 2017).

Cuadro N° 3: Absorción total de macronutrientes por tonelada de fruta fresca de tomate.

Absorción Total (kg/ton)							Autor/es
N	P	K	Ca	Mg	S	K/N	
2,8	0,4	4,5	2,8	0,7	0,9	1,6	Ciampitti y García, (2007)
3	0,5	5				1,8	Bertsch (2009)
2,7	0,4	3,7	2,2	0,8		1,3	Guzmán (2004)
3	1	5	2,5	1		1,8	Martínez et al. (2017)

Fuente: elaborado en base a Ciampitti y García (2007), Bertsch (2009), Guzmán (2004) y Martínez et al. (2017).

Numerosos autores han cuantificado los requerimientos minerales del cultivo de tomate, los resultados obtenidos varían en cada caso dependiendo de factores como rendimiento obtenido, largo de ciclo, tasa de desarrollo y tasa de crecimiento entre otros. En cuadro 3 y 4 se indican absorción y extracción respectivamente, de macro nutrientes en relación a la producción del cultivo, en este caso se presenta la absorción como los

requerimientos totales del cultivo y la extracción refiriéndose a los nutrientes que se exportan del sistema con el órgano cosechable (fruto).

Cuadro N° 4: Extracción total de macronutrientes por tonelada de fruta fresca de tomate.

Extracción (kg/ton)						Autor/es
N	P	K	Ca	Mg	S	
1,9	0,2	3,1	0,1	0,1	0,1	Ciampitti y García, (2007)
2	0,4	3				Bertsch (2009)
2,6	0,5	3,9	1,6	0,4		Martínez et al. (2017)

Fuente: elaborado en base a Ciampitti y García (2007), Bertsch (2009) y Martínez et al. (2017).

2.7 CURVAS DE ABSORCIÓN

Con el término “estudio de absorción” se pretende hacer referencia a todos aquellos estudios que tratan de cuantificar en alguna forma la extracción o consumo de nutrientes por parte de un cultivo para completar su ciclo de producción. Estos estudios contribuyen en forma cuantitativa a dar solidez a los programas de fertilización, pues concretamente permiten conocer la cantidad de nutrientes que es absorbida por un cultivo para producir un rendimiento dado en un tiempo definido (Bertsch, 2009).

Bertsch (2009) indica que la cantidad de nutrientes consumida, absorbida o requerida por una planta se obtiene de asociar el peso seco de los tejidos, con las concentraciones de nutrientes totales presentes en esos tejidos. Estos estudios pueden ser hechos una única vez en el ciclo, como son los que se refieren a requisitos totales y/o de cosecha. Otra forma de hacer estos estudios es contemplando varias etapas (preferiblemente asociadas a cambios fenológicos importantes), durante el ciclo de vida del cultivo, con lo que se pueden elaborar las curvas de absorción. También pueden hacerse contemplando la planta entera como un todo, o subdividido por tejidos. En cualquiera de los casos, lo que siempre es indispensable, es contar con el rendimiento comercial obtenido para ese cultivo que pueda ser asociado a ese consumo en concreto.

La curva de absorción de nutrientes es la representación gráfica de la absorción acumulada de nutrientes por la planta, durante su ciclo de desarrollo. Las curvas de absorción nos permiten conocer, de forma aproximada, las necesidades diarias de los diferentes nutrientes por parte del cultivo. Para determinar las curvas de absorción hay

que cuantificar experimentalmente la absorción de nutrientes realizada en diferentes periodos de crecimiento de la planta, considerando las etapas en las que se producen importantes cambios en el consumo de nutrientes, tales como: desarrollo vegetativo, crecimiento de frutos, maduración, recolección, etc. Los cultivos hortícolas difieren ampliamente en las necesidades nutricionales y en el modelo de absorción, durante el periodo de crecimiento (Segura y Contreras, 2016).

Según Bertsch (2009) al expresar las curvas de absorción en términos porcentuales utilizando el consumo máximo como el 100% y subdividiendo la curva por etapas, quedan completamente explícitos los momentos de máxima absorción. También es posible detectar el tejido en el que preferencialmente se acumula un nutriente, por lo tanto, si éste saldrá del sistema con el producto cosechado o tendrá posibilidades de ser reciclado. Además, si la curva de aplicación se diseña en función de la absorción, permiten establecer un programa gradual a lo largo del ciclo que maximiza la eficiencia de la fertilización en el tiempo. Especialmente en cultivos de ciclo corto y de fertilización intensiva las curvas de absorción permiten hacer un ajuste muy preciso entre lo consumido y lo aplicado.

La fertilización a través del riego localizado de alta frecuencia, mejora la eficiencia del uso de los nutrientes por la planta. Las ventajas de la fertirrigación se basan en la posibilidad de aplicar los nutrientes directamente a la zona donde se desarrollan las raíces, permitiendo controlar la concentración en la solución del suelo y la dosificación de acuerdo con la demanda nutricional de la planta. Para ello es necesario conocer las curvas de absorción de nutrientes en función del tiempo (Segura y Contreras, 2016).

Bertsch (2009) indica que sea cual sea la circunstancia o el cultivo del que se trate, contar con información sobre el consumo real que hacen los cultivos, constituye una herramienta sólida para argumentar técnicamente las recomendaciones de fertilización que se diseñan, ya que finalmente el afinamiento más preciso de un programa de fertilización se consigue con la generación de los datos específicos para la situación particular.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

El experimento se realizó en Rincón del Colorado, Canelones; Uruguay. En instalaciones del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), estación experimental Wilson Ferreira, INIA Las Brujas, unidad de producción hortícola, en el invernáculo N° 1. Ubicado sobre los 34° 40' de latitud sur y 56° 20' de longitud oeste.

Este ensayo ocupó 420 m² de superficie dentro del invernáculo N° 1, el cual estaba orientado de Norte a Sur, contaba con estructura de madera, paredes y techo de polietileno (espesor de 150 µm). La ventilación era pasiva, a través de ventanas laterales con apertura desde arriba hacia abajo y ventana cenital de 0.5 m de altura. Las dimensiones eran de 56 m de largo y 15.5 m de ancho (con un área de 868 m²), 4.5 m de altura de los postes centrales y 2 m en los laterales.

3.2 CLIMA

El ciclo del cultivo transcurrió casi totalmente en la estación de primavera, siendo trasplantado el día 22 de agosto de 2019 y finalizado el día 23 de enero de 2020. En nuestro país se conoce comúnmente con el nombre de ciclo de primavera y es uno de los principales ciclos realizados por los productores.

Según el Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet) las condiciones climáticas de la estación de primavera contemplan una temperatura media de 17,5°C, con precipitaciones promedio en la región sur del país de 305,9mm. El régimen de vientos en nuestro país posee predominio del sector NE al E, con velocidades del orden de 4 m/s, con un máximo medio sobre la costa suroeste de 7 m/s, es relativamente frecuentes la ocurrencia de vientos superiores a 30 m/s.

En el invernadero donde se llevó a cabo el experimento se ubicó una estación meteorológica, que realizó medidas diarias de temperatura (máxima, mínima y media) y Humedad (máxima, mínima y media). Además, se realizó medición de radiación dentro y fuera del invernáculo. Las temperaturas al igual que la radiación incidente aumentan mientras transcurre la estación, dándose valores mínimos en agosto y máximos en mes de diciembre y enero (cuadro 5).

Cuadro N° 5: Temperatura media mensual, humedad relativa media mensual medidas dentro del invernadero y radiación incidente media mensual medida fuera del invernadero, durante el ciclo del cultivo.

Mes	Temperatura media mensual (°C)	HR media mensual (%)	Rad media mensual (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Agosto*	15,6	73,5	11,2
Septiembre	16,0	64,7	17,2
Octubre	18,6	74,2	16,2
Noviembre	22,7	69,5	24,3
Diciembre	24,2	68,4	26,0
Enero*	26,0	69,7	26,1

*Promedios en meses de Agosto y Enero realizado con datos de días con cultivo, no mes completo.

3.3 SUELO

El suelo donde se realizó el ensayo se ubica sobre formación Fray Bentos (Spoturno et al., 2004) y pertenece al grupo CONEAT 10.8b, corresponde a un suelo de tipo Brunosoles Éutricos Típicos Limo Arcillosos con un índice de productividad de 183.

Cuadro N° 6: Perfil de suelo tipo del ensayo.

Hor.	Espe. (cm)	Color	Dap. (t m ⁻³)	Textura	MO (%)	CaCO ₃
A	0-30	Pardo oscuro	1.2	Limoso	3,3	
B	30-55	Pardo oscuro		Franco arcillo.		
BC	55-65	Pardo				Si
C	65- +	Pardo claro				Si

Hor. = horizonte, Espe. = espesor (cm), Dap. = densidad aparente (t m⁻³), Textura = clase textural, Are. = porcentaje de arena, Lim. = porcentaje de limo, Arc. = porcentaje de arcilla, MO = porcentaje de materia

En el cuadro 6 se puede observar un perfil del suelo donde se llevó a cabo el ensayo. El perfil de suelo está compuesto por un horizonte A melánico de unos 30 cm de profundidad de textura limosa y con un contenido de materia orgánica de 3,3%, seguido por dos horizontes subsuperficiales denominados B y BC que llegan hasta los 65 cm de profundidad, a partir de aquí se encuentra la roca alterada por procesos de formación del suelo, denominado horizonte C.

También se realizó un análisis químico de suelo donde se obtuvo el contenido de sodio y los macronutrientes a excepción de azufre, además de eso se evaluaron parámetros como PH, conductividad eléctrica y carbono orgánico (Cuadro 7).

Cuadro N° 7: Características físicas y químicas de la capa de suelo de 0-15 cm antes del transplante. Valores promedios de las parcelas.

Parametro	Valor	Parametro	Valor
Arcilla (%)	35	N-NO3- ($\mu\text{g N g}^{-1}$)	4,4
Limo (%)	61	P ($\mu\text{g N g}^{-1}$)	59,7
Arena (%)	4	Ca+2 (meq 100g⁻¹)	8,3
Carbono orgánico (%)	2,1	Mg+2 (meq 100g⁻¹)	2,0
pH	5,4	K+ (meq 100g⁻¹)	1,0
Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)	0,4	Na+ (meq 100g⁻¹)	0,7

3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS Y DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO

3.4.1 Diseño de los tratamientos

El ensayo conto con tres tratamientos, los mismos consistieron en diferentes soluciones nutritivas que se aplicaron al cultivo mediante fertirriego (Cuadro 8).

- Tratamiento 1: Sin agregados de nitrógeno y potasio en la solución nutritiva.
- Tratamiento 2: 100% de los requerimientos estimados de nitrógeno y potasio.
- Tratamiento 3: 150% de los requerimientos estimados de nitrógeno y 100% de los requerimientos de potasio.

Cuadro N° 8: Aporte de N y K en Kg ha⁻¹ para los diferentes tratamientos.

Tratamiento	N (Kg ha ⁻¹)	K (Kg ha ⁻¹)
T1	0,0	0,0
T2	131,1	794,1
T3	190,4	806,9

3.4.2 Diseño experimental

Fue realizado un diseño en bloques completamente al azar para homogeneizar el ambiente. La heterogeneidad del ambiente se debió a que el suelo donde se implantaron dos de los bloques (N°1 y N°2) provenía de un cultivo de tomate de otoño y los restantes bloques (N°3 y N°4) de suelo sin roturar. También las diferencias en radiación transmitida por las diferentes zonas del invernadero se consideraron causantes de heterogeneidad del ambiente. Los canteros de ambos extremos del invernáculo se consideraron borde del experimento y no se utilizaron para obtención de datos.

Dentro del bloque se asignaron al azar los tres tratamientos, cada uno se aplicó a una parcela de 60 plantas dispuestas en 12 m. En total el ensayo se compuso de 12 unidades experimentales (Figura 9).

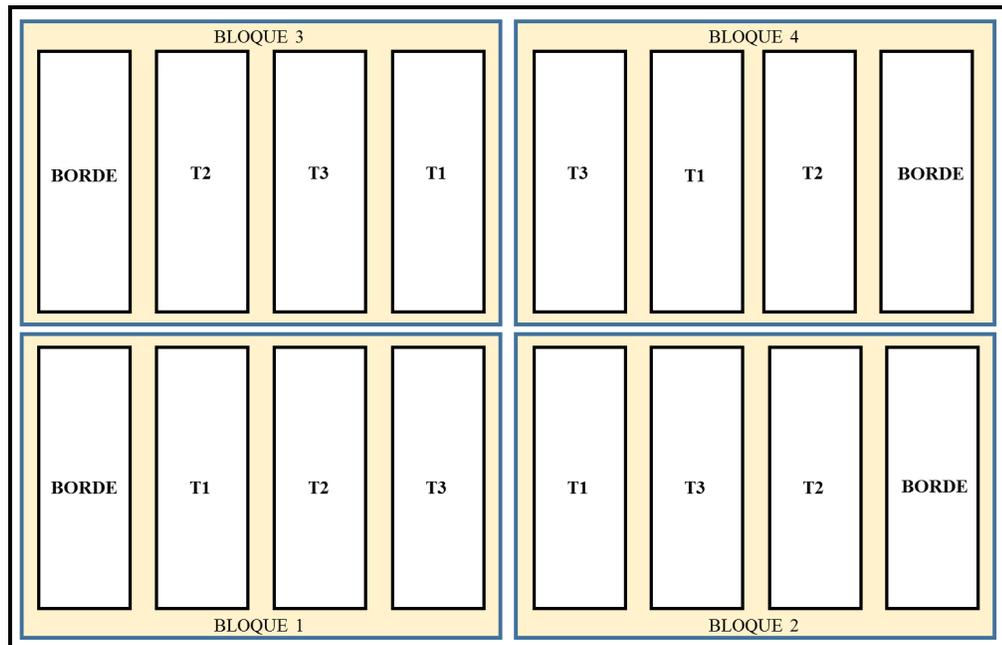


Figura N° 9: Esquema del diseño experimental con los bloques y los tratamientos distribuidos al azar.

3.5 MANEJO DEL CULTIVO

3.5.1 Desbrotos

El desbrote es una práctica convencional realizada en el cultivo de tomate, que consiste en quitar brotes axilares para que estos no afecten el crecimiento y desarrollo del tallo principal. En este caso se realizó con una periodicidad semanal comenzando el día 20 de septiembre (29 días desde el trasplante), hasta el día 9 de diciembre (día 109 desde trasplante), se realizaron 12 desbrotos en total en el ciclo del cultivo.

El criterio se basó en el tamaño de los brotes axilares, se realizaba el desbrote cuando el brote axilar más desarrollado tenía una longitud de 5 cm aproximadamente, esto para evitar la pérdida de fotoasimilados y la formación de heridas de gran tamaño que puedan dar lugar a la incidencia de enfermedades.

3.5.2 Capado o despunte

La técnica de capado al igual que el desbrote es realizada comúnmente por los productores, consiste en eliminar el brote apical de la planta para evitar el desperdicio de fotoasimilados en frutos que no se lograran cosechar debido a que el ciclo se cortara antes de que puedan llegar a madurar. El capado de este cultivo se realizó el día 28 de noviembre (98 DDT). Estado fenológico; maduración de primer y segundo racimo, con el octavo racimo en antesis.

3.5.3 Deshoje:

El deshoje es una práctica que consiste en quitar las hojas basales cuando comienzan a perder capacidad fotosintética, esto mejora la relación fuente fosa de la planta y la partición de asimilados a los frutos. En el cultivo se realizó una sola vez el día 8 de noviembre, el criterio utilizado para determinar si las hojas debían sacarse fue el color y la posición de las mismas. Se quitaron cuatro a cinco hojas por planta, que se ubicaban en la zona inferior del follaje y tenían una coloración verde pálida, con algunos tonos amarillento y en ocasiones partes marrón.

3.5.4 Cosecha

La cosecha del cultivo inicio el día 29 de noviembre de 2019 y finalizó el día 22 de enero de 2020, en total se realizaron 7 cosechas y la frecuencia de esta varió debido al estado de maduración de los frutos. Las primeras 6 cosechas se realizaron con una frecuencia de entre 7 y 10 días una de otra, la última cosecha se realizó dos semanas luego de la anterior y esto se debió a que se la retraso para que más frutos maduren, ya que luego de esta se finalizó el ciclo.

El color de los frutos fue el criterio de cosecha, se colectaron frutos donde predominaban colores naranja y/o rojo. Los frutos que se dejaron en la planta fueron de color verde entero y también aquellos donde el viraje a color naranja apenas estaba iniciando, esto se puede observar en la figura 10.



Figura N° 10: Cultivo luego de cosecha, donde se observan frutos de color verdes y virando a naranja que no se cosecharon.

Posterior a la cosecha los frutos fueron clasificados en diferentes categorías según su tamaño y se quitaron aquellos que tenían defectos como heridas o lesiones, deformaciones y daño por plaga y/o enfermedad. Las categorías fueron cuatro; menor a 50mm, entre 50-65mm, entre 65-80mm y mayor a 80mm, representando categorías que en el mercado local se conocen como chico, mediano, grande y extra respectivamente, estandarizadas de esta forma por la UAM.

3.5.5 Riego

El sistema de riego utilizado fue riego por goteo con goteros antidrenantes y autocompensantes, con dos cintas por cantero y goteros de un caudal de 1L h^{-1} cada 20 cm. El criterio para determinar la cantidad de agua suministrada al cultivo fueron las condiciones climáticas y la cantidad de agua disponible en el suelo basándose en las lecturas de 14 tensiómetros, con el objetivo de mantener el potencial matricial en la zona de la raíz entre -10 a -15 cb. En cada parcela se instaló un tensiómetro a 20 cm de profundidad y en dos parcelas se agregó un segundo tensiómetro a 30 cm de profundidad. Los tensiómetros se instalaron entre medio de las plantas (10 cm de distancia de la planta), esto se puede observar en la figura 11.



Figura N° 11: Tensiómetro instalado en la parcela a 30 cm de profundidad.

3.5.6 Fertilización

La fertilización del cultivo fue realizada completamente por el sistema de irrigación y distribuida en todos los riegos, de forma localizada. Se inyectó una solución nutritiva en cada riego. Esta logra un uso más eficiente de los nutrientes suministrados, además de facilitar la tarea permitiendo una mayor frecuencia.

La solución nutritiva de cada tratamiento se inyectó directamente de tanques (2000 litros) donde previamente se había preparado con las concentraciones definitivas de cada nutriente y posteriormente inyectadas hasta las parcelas mediante el uso de un

programador de riego (RAIN BIRD modelo ESP) y tuberías independientes para los distintos tratamientos (Figura 12).

El pH del agua de riego fue corregido durante todo el ciclo utilizando ácido fosfórico 85% y sus valores oscilaron entre 5,7 a 6,1. Mientras que la conductividad eléctrica se mantuvo en rango de 0,18 a 1,16 ds m⁻¹, dependiendo de la etapa del cultivo.



Figura N° 12: Tanques de fertirriego con tuberías independientes para cada tratamiento.

La estimación de la dosis de fertilización se realizó basándose en el rendimiento esperado del cultivo (20 kg m⁻²) y coeficientes obtenidos de trabajos realizados por Guzmán (2004) y por Ciampitti y García (2007). A partir de estos datos se creó un modelo básico de fertilización para el cultivo, el cual se fue ajustando según resultados obtenidos de monitoreo de solución de suelo.

El monitoreo de solución de suelo se realizó mediante sondas de succión (SDEC) las cuales fueron colocadas en la fila de las plantas a 25 cm de profundidad. El muestreo se realizó semanalmente durante todo el ciclo del cultivo. El procedimiento se basó en la aplicación de vacío (70cb) en las sondas ocho horas después del riego y en la mañana del

siguiente día se realizó la extracción del volumen colectado en el interior de la sonda. La solución de suelo obtenida se midió con medidores rápidos (LAQUAtwin, Horiba).

En la Figura 13 se puede observar curvas de absorción de nutrientes creadas a partir de datos de Guzmán (2004), donde se muestra la evolución de la absorción en forma porcentual, datos que se complementaron con los datos de absorción total de nutriente obtenidos en base a coeficientes de Ciampitti y García (2007) (Cuadro 9) para elaborar el modelo teórico base para la fertilización.

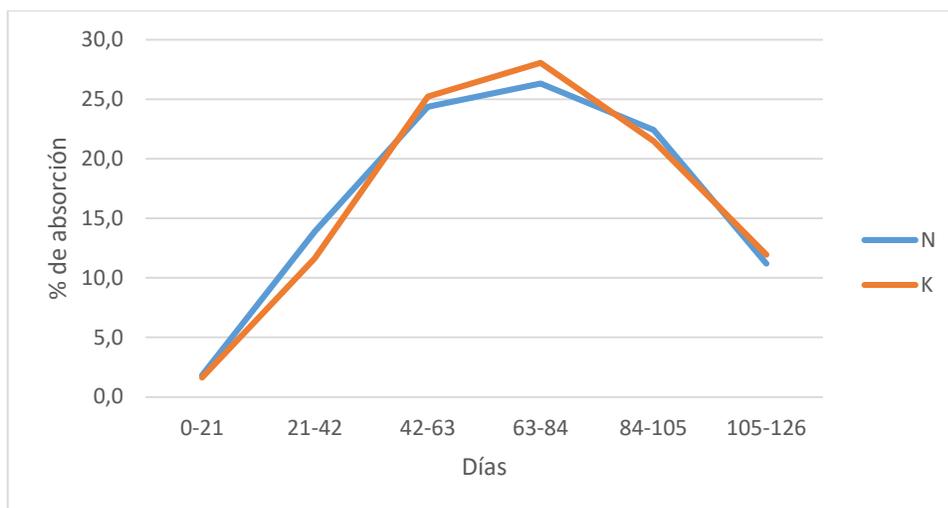


Figura N° 13: Curva de absorción de N y K elaborada en base a Guzmán (2004).

Cuadro N° 9: Requerimientos teóricos para rendimiento de 20kg m⁻² elaborado en base a Ciampitti y García (2007).

Nutriente	Absorción total (kg/ton)	Absorción en kg ha ⁻¹ para 20 kg m ⁻² de fruta fresca
N	2,8	560
K	4,5	900

Para el armado de la solución nutritiva se consideró también el aporte de nutrientes del agua de riego, para ello se realizó un análisis del agua de tajarar utilizada para fertiriego (Cuadro 10).

Cuadro N° 10: Características del agua de riego (muestra colectada en Enero 2020).

Parámetro	Valor
pH	7.2
Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)	0.24
Ca+2 (mg l⁻¹)	15.3
Mg+2 (mg l⁻¹)	2.2
K⁺ (mg l⁻¹)	5.0
Na⁺ (mg l⁻¹)	53.0
N-NO₃⁻ (mg N l⁻¹)	0.5
S-SO₄⁻ (mg l⁻¹)	7.4

Ca+2 = calcio (mg L⁻¹), Mg+2 = magnesio (mg L⁻¹), K+ = potasio (mg L⁻¹), Na+ = sodio (mg L⁻¹), N = nitrógeno como NO₃⁻ (mg N L⁻¹), S = azufre como SO₄⁻ (mg L⁻¹).

Durante el ciclo de cultivo se aplicaron 511 L m⁻² de agua en el tratamiento 1, 505 L m⁻² de agua en el tratamiento 2 y 510 L m⁻² de agua en el tratamiento 3. Teniendo en cuenta que el agua contenía 0,5 mg N L⁻¹ y 5 mg K L⁻¹ según los resultados del análisis de agua, se puede afirmar que se aportó 0,25 g N m² y 2,54 g K m² a cada tratamiento.

3.5.6.1 Aportes de nutrientes

Para el aporte de nitrógeno se consideró la mineralización de la materia orgánica del suelo y el contenido de N mineral. En el caso de la materia orgánica se emplearon algunos supuestos: supuesto N°1; el 6% de la materia orgánica es nitrógeno. Supuesto N° 2: la mineralización de la MOS es de 5% anual. Supuesto N°3; la profundidad de arraigamiento es de 40 cm y corresponden a horizonte A. Supuesto N°4; el ancho de exploración radicular es de 60 cm. Considerando estos supuesto el volumen de suelo en 1ha es de 1500 m³ (Volumen=10.000x^(0,6/1,6)x0,4) considerando que la densidad aparente es de 1,2 t m⁻³, el suelo explorado será de 1.800.000 kg ha⁻¹. Entonces si el contenido de MO es de 3,3% (59.400 kg ha⁻¹), de esa MO se mineraliza un 5% (2.970 kg ha⁻¹) y solo el 6% de lo mineralizado corresponde a N entonces el suelo tiene la capacidad de aportar 178,2 kg de N ha⁻¹ sin embargo, el cultivo se mantuvo durante 5 meses por ende el aporte en esos meses es de 74,25 kg de N ha⁻¹.

El contenido de N mineral fue de 50 µg de NO₃⁻ g⁻¹ de suelo según análisis químico realizado previo a la instalación del cultivo. Si consideramos que el suelo explorado corresponde a 1,800,000 kg ha⁻¹, entonces el cultivo tiene a disposición 90 kg

de $\text{NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ (es decir 20,3 kg de N ha^{-1}). Se consideró que para el primer mes la fertilización nitrogenada no era necesaria, ya que bastaba con el N aportado por el suelo.

El contenido de potasio se determinó mediante análisis químico de suelo. Se determinaron las formas intercambiables de K al extraer con acetato de amonio a pH 7, resultando en un contenido de 0,88 meq K/100g suelo (dato promedio). Considerando que el peso de suelo explorado es de 1.800.000 kg ha^{-1} y suponiendo que el 50% del contenido total de K es fácilmente disponible, el aporte por parte del suelo se consideró en 309 kg de K ha^{-1} , los cuales fueron considerados al realizar el programa de fertilización.

Los tratamientos comenzaron el 23 de septiembre del 2019 con la primera fertirrigación (32 DDT). El tratamiento N°1 no tuvo agregado de nitrógeno y potasio, para el tratamiento N°2 se aplicó en total, 14.02 g m^{-2} de nitrógeno, 84.91 g m^{-2} de potasio y para tratamiento N°3 20.37 g m^{-2} de nitrógeno, 86.29 g m^{-2} de potasio. Con respecto a los tratamientos N°2 y N°3 se buscó que los demás nutrientes no fueran limitantes.

3.5.7 Control de malezas, enfermedades y plagas

Se utilizó mulch de polietileno para evitar crecimiento de malezas en el cantero. Se realizó control de forma manual de aquellas malezas que salieron entre los canteros y en el orificio de la planta. Se realizaron aplicaciones de Isaria Javanica para el control de mosca blanca y Bacillus turingiensis para control de polilla. Se realizaron aplicaciones puntuales de fungicidas e insecticidas de acuerdo con el monitoreo semanal de plagas y enfermedades del cultivo.

3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS DE ABSORCIÓN

El procedimiento para elaborar las curvas de absorción consta de varios pasos que están estrechamente relacionados al diseño experimental, dichos pasos se detallan a continuación.

1. Variedad seleccionada: Se utilizó el cultivar Lapataia de tipo indeterminado por ser una de las variedades más utilizadas por los productores de la región en el ciclo de primavera. El 22 de agosto de 2019 se instaló el cultivo mediante trasplante de plantines de 7 semanas de edad, sembrados en bandejas de 104 celdas. El marco de plantación utilizado fue de 0.20 m entre plantas (una sola hilera) y 1,88m entre filas logrando una densidad de 2,7 plantas/ m^2 .

2. Muestreo de parcela:
 - Muestreo de planta entera: Al realizar el muestreo se escogieron una planta de buen estado sanitario, representativas del estado general de la parcela. Se intentó mantener una frecuencia de muestreo de una planta cada tres semanas (cuadro 11).
 - Fruta: Cosecha de la parcela completa (cosecha de 10 plantas (2 metros)) para peso fresco, se secó una submuestra de 2kg para el peso seco.
 - Deshoje: Hojas de la parcela completa (deshoje de parcela 10 plantas (2 metros)), se secó todo el deshoje.
3. Dividir la planta en los tejidos de importancia: las muestras fueron llevadas al laboratorio, donde las plantas fueron separadas por órganos (hojas, tallos, flor y frutos), antes de pesar y colocar en estufa.
4. Calcular el peso fresco, peso seco y contenido de nutrientes:
 - Peso fresco: Luego de la división de las plantas en los diferentes órganos se pesó con una balanza de precisión.
 - Peso seco: Los órganos fueron colocados en estufa a temperatura controlada (62°C a 66°C) donde permanecieron por el periodo aproximado de una semana, luego de este periodo fueron pesados nuevamente (Figura 14).
 - Concentración de nutrientes en los tejidos: En el laboratorio se determinó N en los tejidos por el método Kjeldahl, mientras que el K fue determinado por espectroscopia de absorción atómica.
5. Calcular la cantidad de nutriente absorbido: Se calculó la cantidad de nutriente absorbido multiplicando la masa de los distintos órganos por su concentración de nutrientes, obteniendo la cantidad de nutrientes en planta. La cantidad de nutrientes absorbido en un periodo resulta de la resta de nutrientes en planta actuales menos nutrientes en planta en medición anterior.

Cuadro N° 11: Estados fenológicos en cada muestreo de biomasa.

Periodo (DDT)	Estado fenológico
0	Inicio de ciclo (Trasplante de plantines)
22	6-7 hojas/1° racimo apareciendo
42	Aparición de 3° racimos /1° en antesis
67	Aparición de 5° racimos
83	Aparición de 8° racimos /6° en antesis
110	Maduración del 3° racimo
139	Maduración del 6° y 7° racimo
153	Final de ciclo



Figura N° 14: División de las plantas en los diferentes órganos: hojas, tallos y frutos.

3.7 ANÁLISIS DE DATOS

3.7.1 Verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas.

Con la prueba de Shapiro-Wilk se verificó si los residuos de las variables estudiadas pertenecían a una población con distribución normal. Las hipótesis estadísticas que se probaron fueron las siguientes:

Ho: los residuales del modelo provienen de una población con distribución normal

Ha: los residuales del modelo no provienen de una población con distribución normal

El criterio de decisión fue si p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk es menor a 0.05 se rechaza Ho con 95 % de probabilidad de cometer error de tipo 1. Todas las variables presentaron p-valor > 0.05 , por lo tanto, provienen de una población con distribución normal.

Con los residuos absolutos de las variables se realizó la prueba de Levene para verificar el supuesto de homogeneidad de las varianzas. Las hipótesis estadísticas que se probaron fueron las siguientes:

Ho: las varianzas son iguales.

Ha: al menos una varianza es diferente.

3.7.2 Método de análisis.

Se compararon los tratamientos mediante ANOVA y se separaron medias utilizando prueba de LSD-Fisher con un nivel de significancia de 0.05 para las variables: número de frutos por planta, frutos no comerciales, peso de frutos, rendimiento, N absorbido, K absorbido, absorción de N y K por tonelada de fruta, eficiencia de uso de N y K y relación K/N. Se utilizó el software infostat. Para las variables repetidas en el tiempo, que se midieron muchas veces en el experimento, se utilizó el procedimiento RM-ANOVA del software Statistica. Las variables analizadas según este procedimiento fueron: materia seca total, materia seca de hojas, materia seca de frutos, N absorbido, K absorbido. Las medias se separaron con LSD-Fischer con un nivel de significancia de 0.05.

4. RESULTADOS

4.1 ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA.

En cuanto a la acumulación de materia seca total (parte aérea de la planta), se observó que en los tres tratamientos la acumulación fue progresiva desde la etapa de plántulas hasta la etapa de cosecha, logrando una materia seca final por parte del T3 de 15694 kg ha⁻¹ seguido por el T2 con 14340 kg ha⁻¹ y T1 13124 kg ha⁻¹.

En la etapa inicial y hasta los 83 días desde el trasplante (DDT) los tratamientos mantuvieron igual tasa de acumulación de materia seca, a partir de los 110 DDT comienza a producirse diferencias significativas entre los tratamientos. Para el muestreo del día 139 el T3 acumuló más materia seca que el T2 y el T1 (Figura 15). Si bien se realizaron muestreos hasta los 153 DDT, solo se presentan hasta los 139 DDT porque el último muestreo presentó una leve caída del peso seco total por planta, que se debe a un error de muestreo, ya que se seleccionaron plantas de menor tamaño.

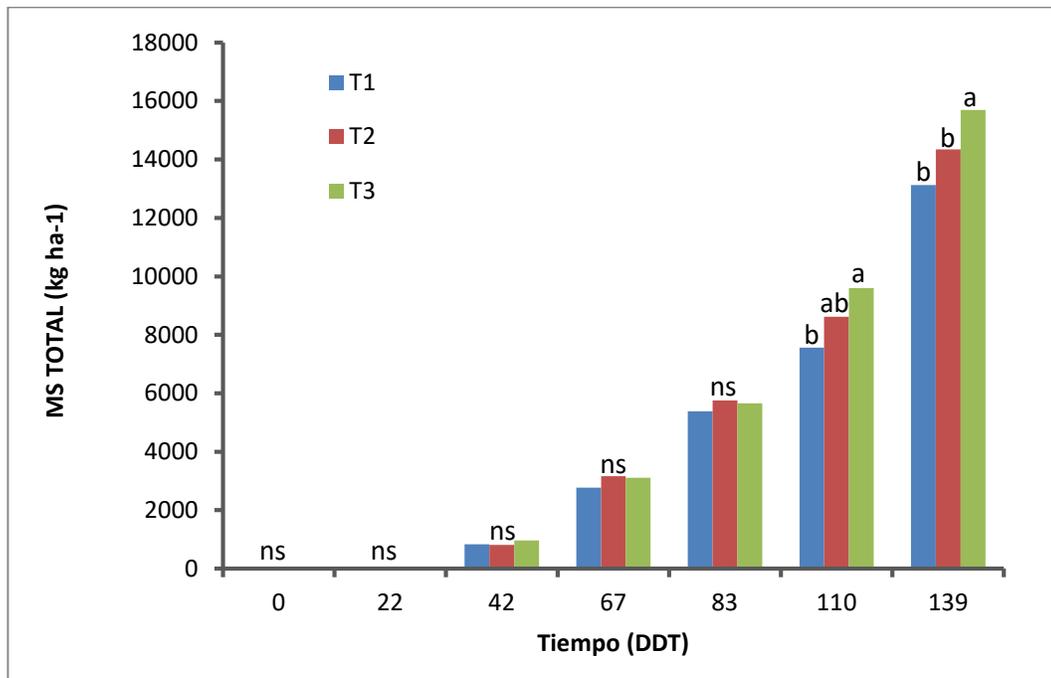


Figura N° 15: Acumulación de materia seca (parte aérea de la planta) según tratamiento de fertiliriego. DDT: Días después de trasplante.

Las diferencias de MS total entre tratamientos fueron mayormente explicadas por las diferencias en crecimiento de las hojas, es decir MS en hojas (Figura 16). La acumulación de MS en hojas no presentó diferencias significativas hasta los 83 DDT, a partir de los 110 DDT se comienzan a observar diferencias significativas entre tratamientos, inicialmente se diferencia T3 (N excedentario) con una mayor acumulación que T1 (N deficiente), mientras que T2 (N suficiente) no se diferencia significativamente de ellos. Para la última fecha de muestreo (139 DDT) se diferenciaron T3 con mayor acumulación de MS que T1 y T2.

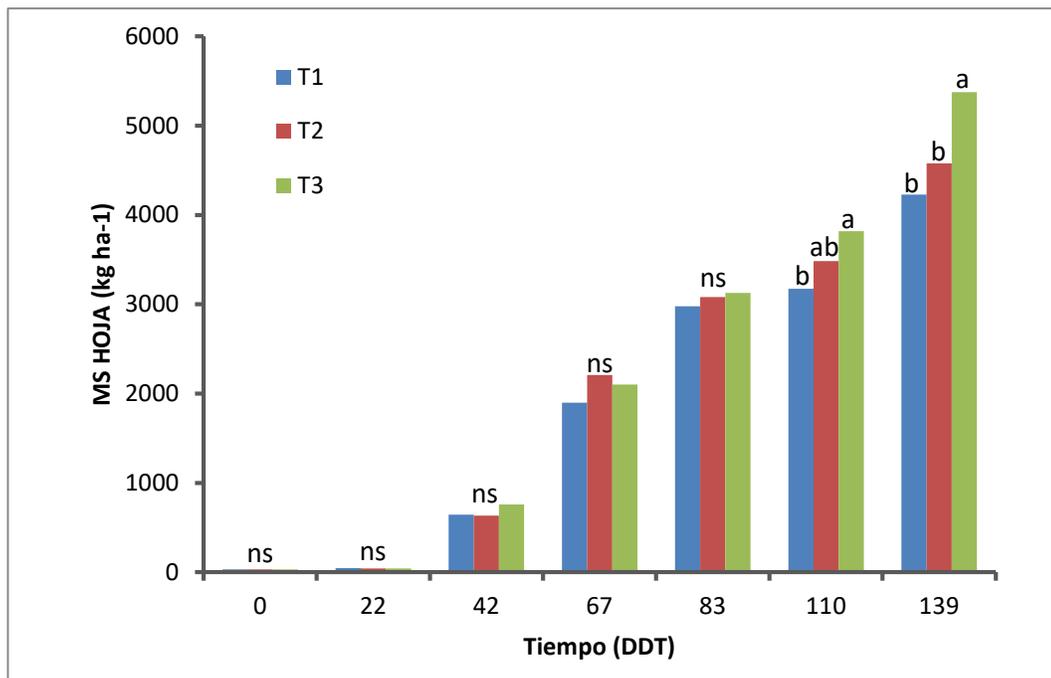


Figura N° 16: Acumulación de materia seca en hoja según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.

La acumulación de MS en frutos fue en aumento durante el transcurso del ciclo, en la gráfica se puede observar que desde los 67 DDT en adelante los frutos aumentan notoriamente su acumulación de MS, mostrando un crecimiento exponencial hasta los 139 DDT (Figura 17). Por otra parte, no se hallaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos. Sin embargo, para la mayoría de los muestreos se observó una tendencia donde el tratamiento T3 fue mayor que T1 y T2 (Figura 17).

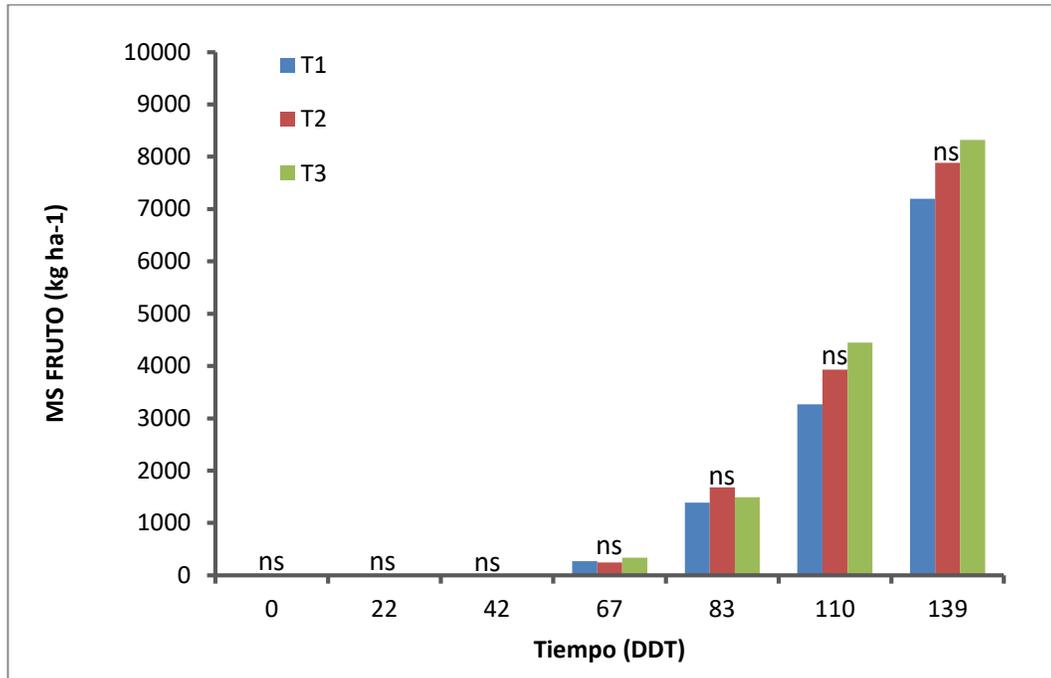


Figura N° 17: Acumulación de materia seca en fruto según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.

4.2 RENDIMIENTO DE FRUTA FRESCA

En cuanto al rendimiento no se encontraron diferencias significativas en los tratamientos, aunque se observó una tendencia a incrementar los rendimientos junto al aumento de fertilización (Cuadro 12).

Cuadro N° 12: Numero de frutos, peso promedio de fruto, frutos no comercial y rendimiento.

Tratamiento	N° de frutos por planta *	Frutos no comercializables (%)**	Peso de frutos *	Rendimiento (kg m ⁻²)
T1	35,8 a	12,0 a	175,9 a	18,1 a
T2	38,9 a	6,4 a	196,0 a	20,7 a
T3	39,9 a	6,7 a	204,9 a	21,7 a

** Fruta no comercializable por tamaño menor 50mm

*Datos de fruta comercializable, no se consideró fruta de descarte por tamaño.

No hubo diferencias significativas en el número de frutos comercializables por planta, en el peso medio de los frutos, ni en la proporción de frutos no comercializables

por tamaño menor a 50mm. Sin embargo, si se identifica una tendencia de mayor número de fruta y peso de frutos en los tratamientos fertilizados.

La fruta con diámetro menor a 50mm fue considerada como descarte por su tamaño. Se observó una tendencia de mayor porcentaje de fruta de tamaño pequeño en el tratamiento sin fertilizar. Además, se descartaron frutas con defectos como podredumbre apical y fruta deforme, en muchos casos la fruta se descartaba por más de un defecto siendo el tamaño principal causa de descarte seguido de podredumbre apical y fruta deforme.

4.3 ABSORCIÓN DE NUTRIENTES

4.3.1 Absorción de nitrógeno

En términos generales el T3 (N excedentario) fue el tratamiento de mayor absorción, seguido por T2 (N suficiente) y T1 (N deficitario), reflejando la cantidad de N disponible para los diferentes tratamientos (cuadro 13).

Cuadro N° 13: Nitrógeno total absorbido según tratamiento.

Tratamiento	Nitrógeno total absorbido (kg N ha ⁻¹)
T1	289 c
T2	333 b
T3	381 a

La absorción de N no mostró diferencias entre tratamientos hasta los 83 DDT. Para las mediciones de 110 DDT el T3 es el que mostró mayor absorción y se diferencia de T1, a los 139 DDT los tres tratamientos se diferenciaron (Figura 18).

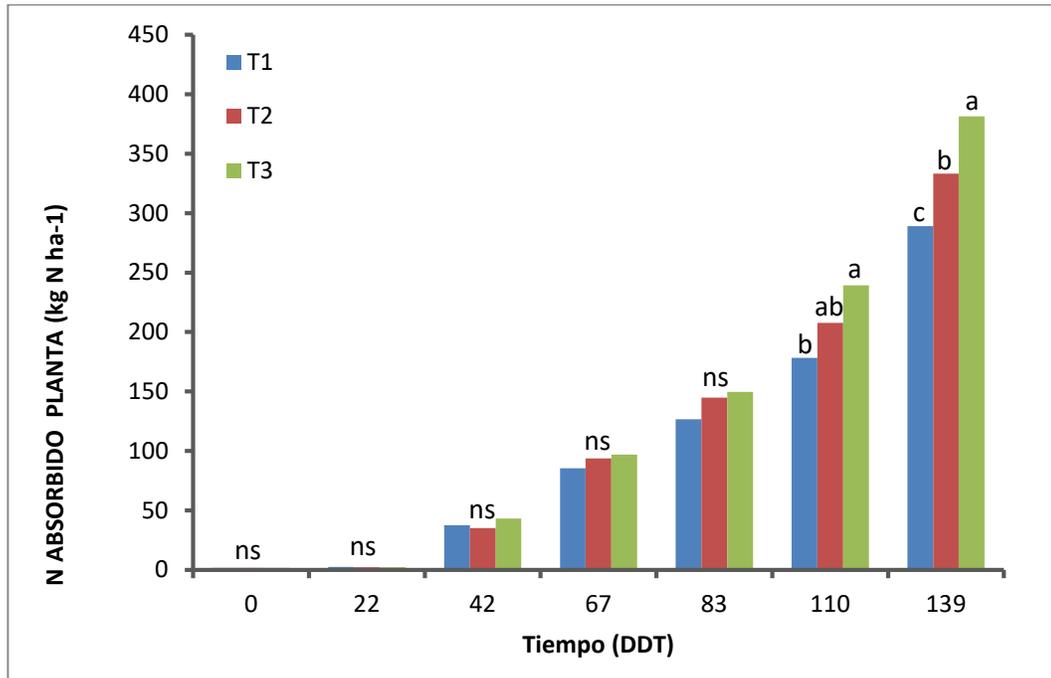


Figura N° 18: Nitrógeno total absorbido por superficie según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.

El contenido de N del cultivo vario a lo largo del ciclo, mientras que entre los tratamientos fue similar. Tiene un pico entorno a los 42 DDT y luego desde los 67 DDT en adelante se mantiene entre 2 y 3 % (Figura 19).

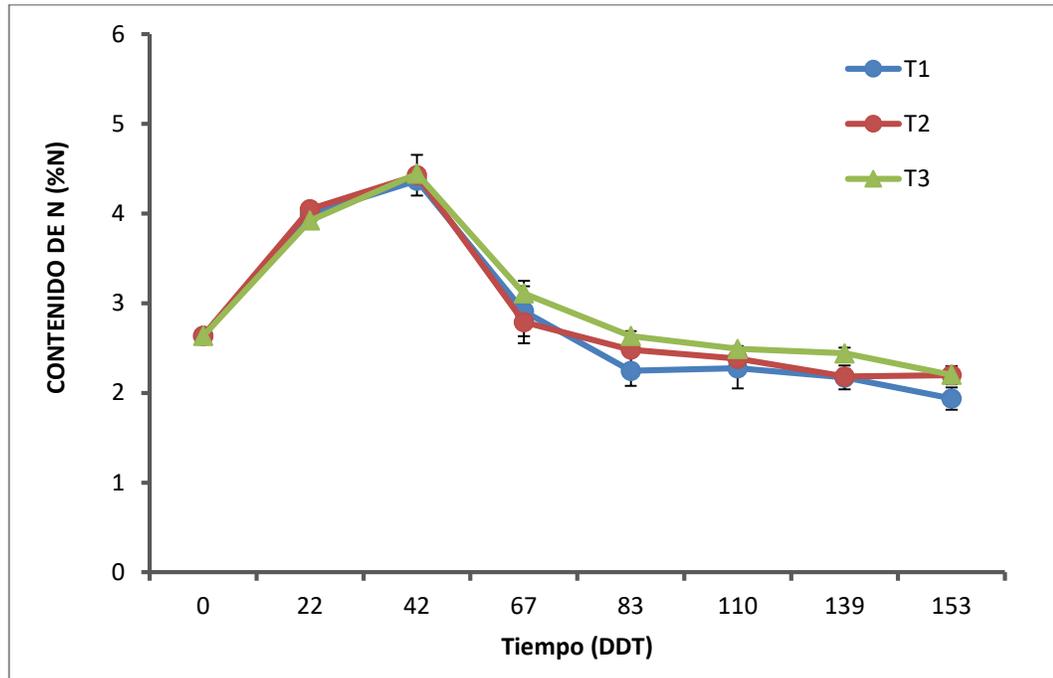


Figura N° 19: Evolución del contenido total de nitrógeno según tratamiento. DDT: Días después del trasplante.

4.3.2 Absorción de potasio

Al igual que con el N el tratamiento T1 (K deficitario) fue el tratamiento con menor absorción a lo largo del ciclo, mientras que entre T2y T3 (K suficiente) no se encontró diferencia (Cuadro 14).

Cuadro N° 14: Potasio total extraído según tratamiento.

Tratamiento	Potasio total absorbido (kg K ha ⁻¹)
T1	515 b
T2	652 a
T3	697 a

Los tratamientos no presentaron diferencias significativas hasta los 83 DDT. A partir de los 110 DDT se hallaron diferencias entre los tratamientos, inicialmente se diferencia T3 de T1 (110 DDT), luego en el siguiente muestreo (139 DDT) se establecen diferencias entre T1 y los tratamientos con aportes (T2 y T3) que presentan una mayor absorción (Figura 20).

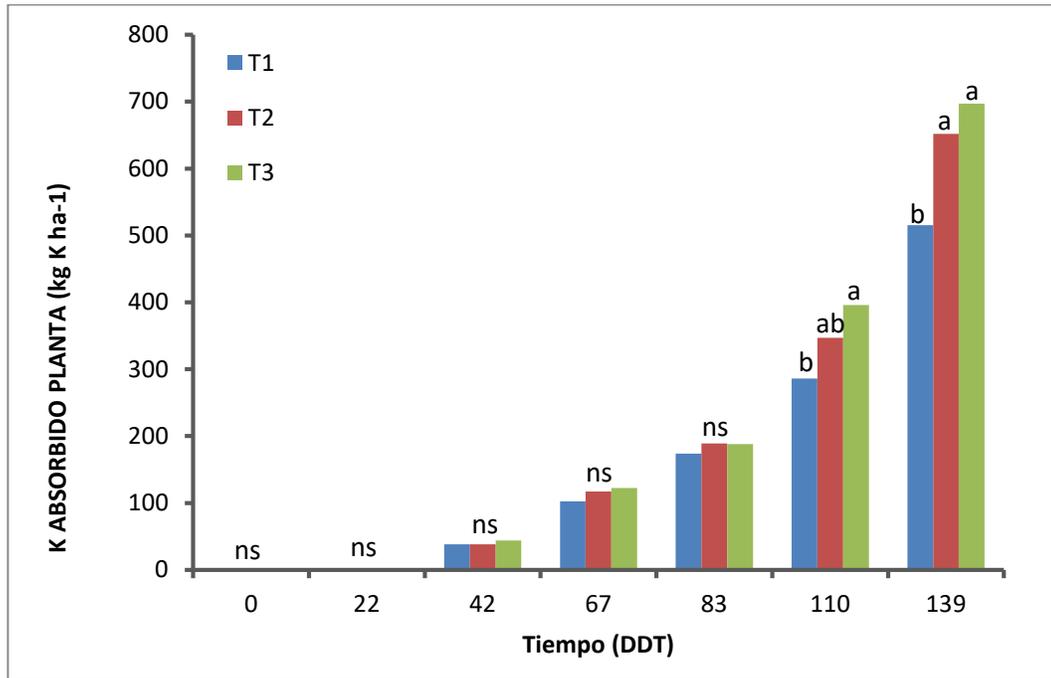


Figura N° 20: Potasio total absorbido por superficie según tratamiento de fertirriego. DDT: Días después de trasplante.

La concentración de K en los tejidos vario durante el ciclo del cultivo (Figura 21). Se observa un pico ocurrido a los 42 DDT una posterior disminución hasta los 83 DDT y un segundo pico a los 139 DDT. Los tratamientos mantuvieron mas o menos la misma concentración hasta los 83 DDT desde este momento en adelante T1 mantuvo menor contenido que T2 y T3.

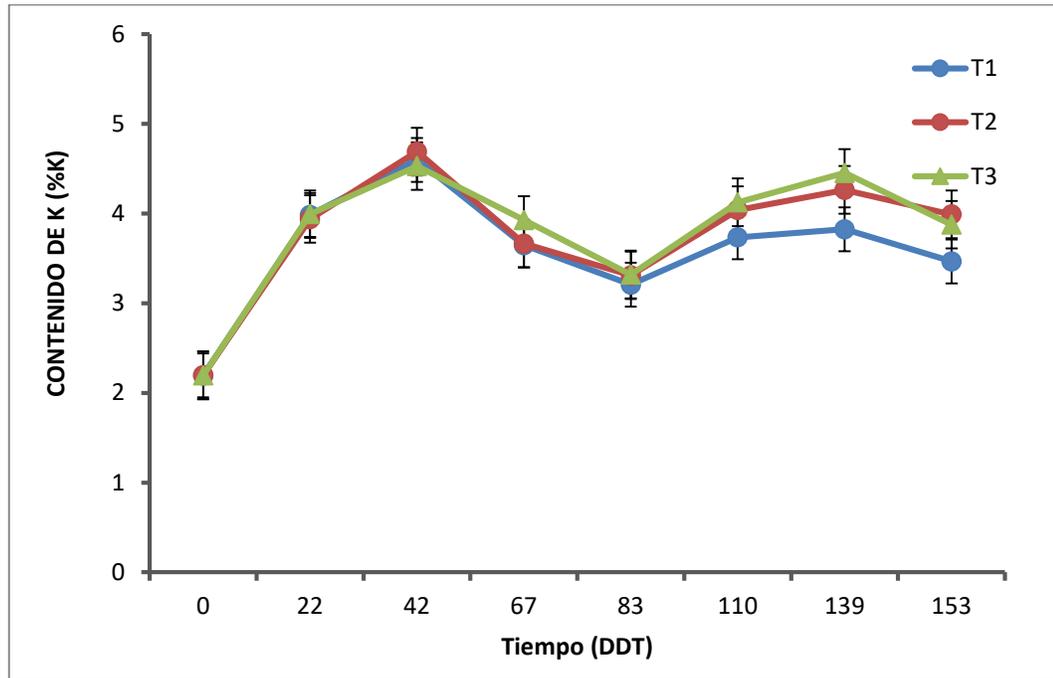


Figura N° 21: Evolución del contenido total de potasio según tratamiento. DDT: Días después del trasplante.

4.3.3 Absorción de nutriente por etapa

Para brindar una referencia más precisa en cuanto al ciclo del cultivo se identificaron los estados fenológicos en cada instancia de muestreo (Cuadro 11), luego se identificó la absorción de nutrientes para cada etapa del cultivo (Cuadro 15).

La absorción de nutrientes fue de menor magnitud en los primeros 60 DDT, a partir de este momento se observó un aumento en la absorción de nutrientes, identificándose los picos de absorción en la etapa 120-150 DDT (Cuadro 11 y 15), logrando absorber 28% del N y 35% del K total absorbido.

Cuadro N° 15: Nitrógeno y potasio absorbido por etapa de cultivo, realizado en base al tratamiento con 100% requerimientos cubiertos.

Días	N absorbido (kg N ha ⁻¹)	% del N absorbido por etapa	K absorbido (kg K ha ⁻¹)	% de K absorbido por etapa
0-30	15,3	4,6	16,6	2,5
30-60	62,1	18,6	78,5	12,0
60-90	83,7	25,1	134,9	20,7
90-120	78,0	23,4	193,3	29,6
120-150	94,1	28,2	228,8	35,1

*día 0 = Trasplante de plantines

Aparte de conocer la demanda total de cada nutriente para determinada etapa del cultivo es útil conocer el destino de estos nutrientes. El índice de cosecha de un nutriente es la relación entre la cantidad de nutriente absorbido por la planta y el recuperado por el órgano cosechado. Con respecto al índice de cosecha, no se encontraron diferencias entre tratamientos. Desde los 42 DDT la mayor proporción del nitrógeno se encuentra en el órgano cosechable, los frutos. Lo mismo ocurre con la proporción de K en los frutos (Figura 22). Durante la maduración de los frutos, la proporción de K que se concentró en los frutos fue mayor que para N, llegando a un índice de cosecha máximo de 0.69 para el K y 0.57 para el N.

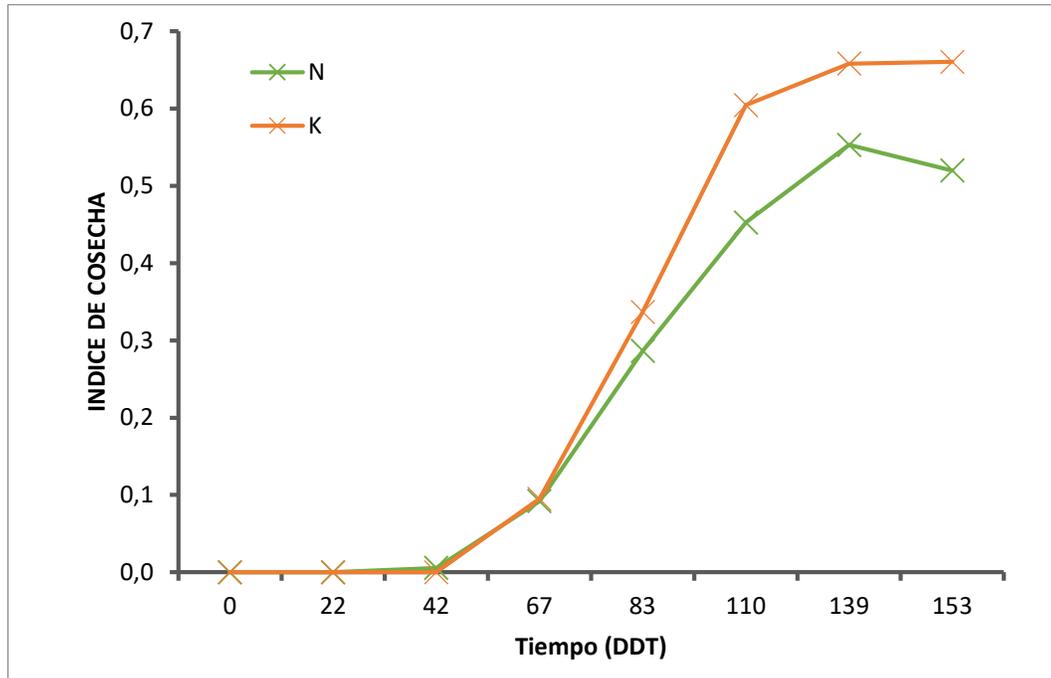


Figura N° 22: Índice de cosecha promedio de los tres tratamientos para nitrógeno y potasio.

4.4 ABSORCIÓN DE NUTRIENTES POR TONELADA

La absorción por tonelada de fruta fresca cosechada estuvo entre 1,58 y 1,74 kg de N y 2,78 y 3,17 kg de K. No se encontraron diferencias significativas entre los tres tratamientos. Sin embargo, se observó una tendencia al aumento de la absorción en los tratamientos con fertilización (Cuadro 16).

Cuadro N° 16: Absorción de nutrientes por tonelada de fruta fresca cosechada según tratamiento.

Tratamiento	N (Kg/ton Fruta Fresca)	K (Kg/ton Fruta Fresca)
T1	1,58 a	2,78 a
T2	1,62 a	3,17 a
T3	1,74 a	3,17 a

4.5 EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES

La eficiencia de uso de nutriente fue definida como la cantidad de fruta fresca que se produce por g de nutriente absorbido, en este caso no presentó diferencia entre los tratamientos (Cuadro 17).

Cuadro N° 17: Eficiencia de uso del nitrógeno y el potasio absorbido por gramo de fruta fresca según tratamiento.

Tratamiento	EF N (Kg FF/g N absorbido)	EF K (Kg FF/g K absorbido)
T1	0,64 a	0,37 a
T2	0,62 a	0,32 a
T3	0,58 a	0,32 a

4.6 RELACIÓN DE ABSORCIÓN ENTRE POTASIO Y NITRÓGENO

A pesar de las diferencias notorias en el suministro de nutrientes, se encontró que en los diferentes tratamientos la relación entre el K y N absorbido no varió significativamente. Dicha relación oscilo entre 1,76 y 1,96 (Cuadro 18).

Cuadro N° 18: Relación de absorción K/N.

Tratamiento	Relación K/N
T1	1,76 a
T2	1,96 a
T3	1,83 a

5. DISCUSIÓN

5.1 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS DE FERTIRRIEGO

La MS total en planta fue mayor en los tratamientos con aportes de fertilizante (T2 y T3), respecto al tratamiento sin aporte (T1). El nitrógeno es el elemento que, más que ningún otro, controla la tasa de crecimiento de las plantas (Peet, 2005) y podría explicar mayormente las diferencias entre tratamientos. Las diferencias encontradas entre tratamientos se producen principalmente en la MS vegetativa del cultivo, especialmente en la MS de hojas. La acumulación de MS en frutos, el rendimiento y los componentes del rendimiento (número de frutos y tamaño medio de frutos) no presentó diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, se observó una tendencia a que los tratamientos con fertilización logran más rendimiento, número de frutos por planta, tamaño medio de frutos y % de frutos comercializables (mayores a 50 mm). Es probable que esta ausencia de diferencias se deba al aporte de nitrógeno proveniente de la mineralización de la materia orgánica del suelo. En etapas iniciales (0-83 DDT) no se observan diferencias en absorción de N entre tratamientos, debido a que los requerimientos en esta etapa son bajos y fueron cubiertos por los contenidos de N mineral (20,3 kg N ha⁻¹) que se encontraban en el suelo y los aportes por mineralización de la MOS. La tasa de mineralización de la materia orgánica es afectada por las condiciones ambientales donde se desarrolla el proceso (Monsalve et al., 2017). Es probable que al inicio del cultivo las condiciones para la mineralización de la materia orgánica fueran favorables, la preparación de suelo previo a la implantación del cultivo puede ser principal responsable de este aumento en la mineralización, según Ringuelet y Bachmeier (2002) reportaron 200% más mineralización neta de N en suelo disturbado que en suelo no disturbado.

A partir de los 110 DDT se comienza a encontrar diferencias entre las cantidades de N absorbidas por tratamiento. Esto concuerda con los aportes por fertirriego, diferenciando los tratamientos con aportes del tratamiento si aportes. Además, en esta etapa se incrementa la tasa de crecimiento del cultivo, principalmente debido al crecimiento de los frutos. Según indica Gastal y Lemaire (2002) con un adecuado aporte de N la absorción de este es determinada en gran medida por la tasa de crecimiento del cultivo. Lo que, combinado con una mantención o caída del aporte desde el suelo (Ringuelet y Bachmeier, 2002), pudo limitar la absorción de T1. De igual manera, se observa mayores absorciones de K por parte de los tratamientos con aportes. Esto concuerda con Bugarín et al. (2002), que indica que cuando el suministro de K no tiene restricciones la tasa de absorción dependerá en gran medida de la demanda por el cultivo, la cual depende de la tasa de crecimiento. Entonces, podemos concluir que a partir de los 110 DDT el suministro de K por parte del suelo comienza a tener restricciones. Además,

debido a las condiciones climáticas la tasa de crecimiento del cultivo aumenta, por lo tanto, su demanda también. Por otra parte, la ausencia de fertilización nitrogenada en T1 influye negativamente en la tasa de crecimiento y contribuye a las diferencias encontradas (Peet, 2005).

A pesar de las restricciones para la absorción en T1, el rendimiento alcanzado en este tratamiento fue de 18 Kg m^{-2} . Estos valores superan a los valores promedio de rendimiento de los productores de la zona sur que es de $9,8 \text{ Kg m}^{-2}$ (MGAP. DIEA, 2017) y se acercan al rendimiento potencial estimado por Berrueta et al. (2020a), que es de $19,4 \text{ Kg m}^{-2}$. El tratamiento T1 sin agregado de fertilizantes pudo absorber 289 kg N ha^{-1} y de 515 kg K ha^{-1} del suelo. Esto significa que existe un aporte muy importante del suelo que pudo ser absorbido por la planta y le permitió alcanzar un alto rendimiento. Los aportes de N por parte del suelo se dan principalmente por mineralización de la materia orgánica del suelo (Guzmán, 2004). La mineralización neta de N, así como su tasa de mineralización, dependen, tanto de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, como de la composición y las condiciones ambientales donde se desarrolla el proceso (Monsalve et al., 2017). Según Berrueta et al. (2019) cultivos con más del 2.5% de COS encontraron menores brecha de rendimiento, logrando rendimientos superiores al promedio de su grupo ($15,9 \text{ kg m}^{-2}$). En este caso el contenido COS es de 2,1% lo que en condiciones que incrementen mineralización permite un alto suministro de N.

Según el análisis de suelo el contenido de K al trasplante del cultivo era de $0,88 \text{ meq K/100g suelo}$, adicionalmente los aportes por agua de riego fueron de $25,5 \text{ kg K ha}^{-1}$, en un total de 511 L m^{-2} . En estas condiciones, el tratamiento sin aporte de fertilizante logró extraer 515 kg K ha^{-1} . Sparks y Huang (1985) señala que la reposición del K en solución ocurre principalmente por la liberación del K intercambiable de los minerales arcillosos y la materia orgánica. Entonces el K absorbido correspondería a la fracción K en solución de suelo, así como a la fracción de K intercambiable. Según Sparks y Huang (1985) el stock de K intercambiable es frecuentemente suficiente para satisfacer los requerimientos de un cultivo, pero demasiado pequeño para ser capaz de cubrir los requerimientos de varios cultivos sucesivos. Debido a su contenido de arcillas y MOS, el suelo donde se desarrolló el experimento, tiene una capacidad de suministrar gran cantidad de K, pudiendo cubrir satisfactoriamente los requerimientos del cultivo. Sin embargo, podría no ser suficiente para cultivos posteriores según Sparks y Huang (1985).

Estas consideraciones resaltan la importancia que tiene un suelo con altos contenidos de materia orgánica y niveles altos de potasio, que son capaces de suministrar cantidades muy elevadas de nutrientes a los cultivos. Especialmente en las primeras etapas (hasta 83 DDT), donde logran cubrir los requerimientos. Además, considerar los aportes del suelo a la hora de realizar los planes de fertilización repercute en el resultado productivo y económico. Más aun considerando la importancia del costo de los

fertilizantes en este cultivo, 6% de los costos totales del cultivo de tomate, según Berrueta et al. (2020b). Mantener y conservar el suelo no solo es importante por su capacidad de aporte de nitrógeno y potasio. En el caso de la materia orgánica se considera un indicador de la salud del suelo, mejora la estabilidad estructural del suelo, mejora la aireación la porosidad y la infiltración de agua para apoyar el crecimiento de las plantas. Se asocia con una alta fertilidad del suelo, contribuyendo a la disponibilidad de nutrientes y agua (FAO, 2017).

5.2 CONSUMO DE NUTRIENTES POR EL CULTIVO.

La absorción de nitrógeno y potasio por parte de los tratamientos fertilizados (T2 y T3) fue mayor que el tratamiento sin fertilizar (T1) debido en gran medida al aporte por fertirriego. Si bien se encontraron diferencias en la absorción de N por parte de T2 y T3 absorbiendo 333 y 381 kg N ha⁻¹ respectivamente, estas diferencias tienen una magnitud bastante menor a las diferencias en aportes de nutrientes. En este caso se observa que la planta de tomate mantiene los niveles de absorción de N aun en presencia de un aumento de 50% del suministro de dicho nutriente, tal como señala Sonneveld y Voogt (2009), las plantas poseen un fuerte control sobre la absorción de los principales nutrientes y al encontrarse bajo condiciones de disponibilidad excesiva de macronutrientes en el ambiente radicular, grandes diferencias externas resultan en pequeñas diferencias de concentración interna. La baja absorción de potasio por parte de T1 puede deberse a baja disponibilidad de K en solución y/o al bajo aporte de N. Sparks y Huang (1985) señalan que el K en solución es liberado de minerales arcillosos y materia orgánica, si bien el suelo tiene K suficiente para mantener el cultivo, la tasa de liberación podría ser menor a la tasa de absorción del cultivo. Por otra parte, T1 al no tener aporte de N mantiene menor tasa de crecimiento (Peet, 2005), por ende, la demanda por el cultivo será menor a la de los tratamientos fertilizados (Bugarín et al., 2002).

La absorción de nutrientes por tonelada de fruta fresca no presentó diferencia significativa (cuadro 15). Sin embargo, los valores obtenidos son menores a los obtenidos por Ciampitti y García (2007), Guzmán (2004), Bertsch (2009) y Martínez et al. (2017). Estas diferencias se pueden deber a la variedad utilizada, ciclo del cultivo y las condiciones edafoclimáticas del lugar donde se realizaron los diferentes experimentos. Estos resultados se pueden interpretar como una mayor eficiencia de utilización de los nutrientes, es decir una mayor producción de fruta por unidad de nutrientes aportados. Según Sonneveld (1997) la eficiencia mediante la cual el cultivo utiliza los nutrientes minerales aumenta junto a la productividad. Cabe indicar que los rendimientos obtenidos están próximos a los potenciales de la región (Berrueta et al., 2020a) lo que podría aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes. Además, se debe tener en cuenta que

incrementando la eficiencia de uso de los nutrientes y consecuentemente, la eficiencia global del sistema, genera una mayor potencialidad en beneficios económicos y sustentables en el largo plazo de producción (Ciampitti y García, 2007).

En términos generales la máxima absorción de N y K ocurrió en la etapa de cosecha, mismos resultados que encontramos en Saravia (2004) y Betancourt y Pierre (2013). La absorción está estrechamente relacionada al destino de los nutrientes y a la tasa de crecimiento de los órganos fosa. Los órganos vegetativos fueron el principal destino de nutrientes en etapas iniciales, a medida que avanzó el ciclo la proporción de nutrientes destinados a frutos fue en aumento. Los frutos fueron los órganos de mayor demanda en el ciclo, la cantidad de nutriente destinados a ellos fue de 60% del N absorbido y 70% del K absorbido (Figura 22). Esto concuerda con Betancourt y Pierre (2013) quienes indican que los frutos son los principales extractores de nitrógeno y potasio. Peet (2005) afirma que aproximadamente el 70% del K absorbido pasa a la fruta. Según Hernández et al. (2009) la mayor extracción por parte de los frutos coincide con la alta demanda metabólica que ejercen en la planta durante su etapa de rápido crecimiento.

La absorción de N mantuvo mayor homogeneidad durante el ciclo respecto a la absorción de K. En el caso de N la absorción aumenta progresivamente logrando absorber 48% del N en los primeros 90 DDT, luego en etapa 90-150 DDT se consumen el restante 52%, siendo la etapa 120-150 DDT la de máxima absorción con 28,2% del N total absorbido. La absorción de K al inicio de ciclo permanece baja hasta los 60 DDT logrando absorber 14,5% del K y luego tiene un importante aumento logrando absorber el restante 85,5% en periodo 60-150 DDT (etapa de aparición de racimos de fruta y posterior crecimiento), la etapa de mayor absorción fue el periodo de 120-150 DDT (cuadro 15). Esto difiere con Guzmán (2004) que ubica el pico de absorción de K en el periodo 63-84 DDT, mientras que Saravia (2004) indica que ocurre a los 80 DDT y Bertsch (2009) a los 75 DDT, estas diferencias se pueden explicar por la variedad cultivada y por las diferencias en condiciones ambientales que repercuten directamente en el crecimiento y desarrollo del cultivo, por ende, en la absorción de nutrientes. Además, en Saravia (2004) encontramos que el momento cuando ocurre el pico de absorción es notoriamente más marcado, y esto responde principalmente a la acumulación de MS. Resultados similares se encuentran en el presente experimento, donde la absorción de N y K se comporta de manera casi idéntica a la acumulación de MS.

5.4 RELACIÓN ENTRE NUTRIENTES

En el presente ensayo se realizó un plan de fertilización considerando aportes del suelo, es decir que la solución aportada será modificada al entrar en contacto con la solución de suelo. La relación K:N aportado fue de 5:1 en T2 y de 4:1 en T3, mientras que Peet (2005) indica que la relación requerida en floración del primer racimo es de 1,2:1 esta relación aumenta durante el ciclo llegando a 2,5:1 en floración de noveno racimo.

Aun cuando estas relaciones se alejan bastante de lo recomendado en la bibliografía, no se constató síntomas de desbalance por exceso de K.

Aunque las relaciones entre nutrientes aportados fueron diferentes entre los tratamientos, la relación entre las cantidades absorbidas no varió significativamente entre ellos (cuadro 16). La relación K:N absorbido osciló entre 1,76 y 1,96, debido a esto se podría interpretar que hay procesos fisiológicos que regulan el consumo de nutrientes y que determinadas relaciones se mantienen más o menos constante en la planta.

Las relaciones K/N encontradas en Ciampitti y García (2007), Bertsch (2009), Martínez et al. (2017), fueron 1,6; 1,8 y 1,8 respectivamente, resultan similares a la obtenida en el presente ensayo. Greenwood y Stone (1998) establecieron que la concentración de N, K y otros cationes (magnesio y calcio) decrece a medida que aumenta el tamaño de la planta (materia seca). Este decrecimiento es resultado de un incremento relativo del material estructural y compuestos de almacenamiento comparado con el incremento en la acumulación de nutrientes. Además, encontraron que el K decrece proporcionalmente al N a medida que aumenta la materia seca de las plantas. Esto concuerda con lo obtenido en este trabajo (cuadro 3) y la coincidencia con las relaciones entre nutrientes obtenidas por Ciampitti y García (2007), Bertsch (2009), Martínez et al. (2017).

Conocer la existencia de esta relación es realmente útil al momento de planificar la fertilización del cultivo para poder mantener los aportes en un rango más o menos similar y tratar de maximizar la eficiencia de los mismos. Si bien en las condiciones de producción de nuestro país el suelo actúa como búfer evitando muchas veces que mediante los aportes se provoquen desbalances, es realmente importante poder realizar aportes considerando los requerimientos y las relaciones entre nutrientes, para maximizar la respuesta.

6. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se logró identificar y cuantificar la absorción de N y K en distintas etapas fenológicas del cultivo de tomate para el sur del país. La absorción por parte del T2 (tratamiento con 100% de aportes cubiertos) fue de 333 kg de N ha⁻¹ y de 652 kg de K ha⁻¹. La absorción por tonelada de fruta producida fue de 1,62 kg de N y 3,17 kg de K. Los periodos de inicio de cultivo mantuvieron niveles de absorción bajos, a partir de los 60 DDT aumento el consumo por el cultivo debido a la demanda por los frutos, estos fueron los órganos a los que se destinaron mayor cantidad de nutrientes (60% del N y 70% del K). El periodo de mayor absorción fue 120-150 DDT, tanto para el N así como para el K.

Los tratamientos fertilizados lograron mayor absorción de N y K, debido a esto mantuvieron mayores tasas de crecimiento en algunos periodos y lograron mayor acumulación de MS total. Sin embargo, la MS en frutos no varió significativamente entre los tratamientos (T1, T2 y T3) por ende, no hubo diferencias significativas entre el rendimiento de los distintos tratamientos. Se evidencia cierta capacidad de la planta para mantener la relación de absorción entre K:N, a pesar de la aplicación excedente de N.

El T1 aun cuando no se realizó aporte alguno de fertilizante logro absorber cantidades importantes tanto de N como de K, demostrando que suelos de similares características son capaces de mantener altas tasas de crecimiento y alcanzar buenos rendimientos sin adición de fertilizantes. Se evidencia la importancia de las características fisicoquímicas del suelo para el suministro de nutrientes a los cultivos. La mantención del recurso suelo puede significar una reducción significativa del aporte de fertilizantes, minimizando los costos de producción.

La presente investigación es extrapolable para productores que manejen sistemas productivos con características similares a las del ensayo. Aportando información concreta de los requerimientos en ciclo primavera/verano, en condiciones ambientales de la zona de producción y demostrando la importancia del recurso suelo para la nutrición del cultivo de tomate. La información generada es un insumo clave para planificar la fertilización de los cultivos y la mejora en la gestión del fertirriego, aumentando así la eficiencia de utilización de los nutrientes y contribuyendo a generar sistemas más sustentables.

La fertilización de cultivos debe manejarse en función de la cuantiosa información existente y asociarse con otras prácticas de manejo de suelos y cultivos que preservan y mejoran la sustentabilidad y calidad del recurso suelo (Ciampitti y García, 2007). Es necesario profundizar en los estudios relacionados a los requerimientos nutricionales de los cultivos hortícolas en nuestro país, donde las condiciones de

crecimiento varían respecto a otros países y son las causantes de las diferencias en cuanto a dosis y momento de aplicación como se comprobó en este experimento. Con la realización de ensayos similares a los llevados a cabo en este trabajo se podrá generar información para mejorar los planes de fertilización de los cultivos, ajustados a las condiciones de crecimiento, variedades y ciclos de producción.

7. RESUMEN

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) es el cultivo que mayor área protegida ocupa en Uruguay, con 243 ha según datos de zafra 2014/2015 (MGAP. DIEA, 2017) y es la segunda hortaliza en cuanto a ingreso al Mercado Modelo. Los rendimientos del cultivo no han aumentado desde la temporada 2002-2003 (MGAP. DIEA, 2017). Estos rendimientos son inferiores a los alcanzables en la región con similares recursos productivos y buen manejo siendo los principales factores limitantes del rendimiento el manejo de la nutrición potásica en primer lugar y la nutrición nitrogenada en los cultivos de ciclo corto de primavera y verano para la zafra 2014/15/16 (Berrueta et al., 2019). Para contribuir a la mejora de la gestión de la fertiirrigación a nivel de predios se determinaron en este trabajo las curvas de absorción de nitrógeno y potasio (cantidades y momentos de absorción) para tomate indeterminado cultivado en primavera/verano bajo condiciones de invernadero en Uruguay con distintos niveles de fertilización con nitrógeno (deficiente, suficiente y excedentario). El ensayo se realizó en la estación experimental “Wilson Ferreira” (INIA, Canelones, Uruguay) en tomate variedad Lapataia de tipo indeterminado durante la zafra primavera/verano 2019/20. El ensayo contó con tres tratamientos; T1 sin agregados de nitrógeno y potasio, T2 con agregado de 100% de los requerimientos estimados de nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio y micronutrientes, y T3 con agregado 150% de los requerimientos estimados de nitrógeno y 100% de los requerimientos del resto de los nutrientes. Se observó que T3 fue el tratamiento con mayor acumulación de materia seca con 15694 kg ha⁻¹, seguido por T2 y T1 con 15290 kg ha⁻¹ y T1 13124 kg ha⁻¹ respectivamente. Las diferencias se comenzaron a observar a partir de los 110 DDT y estuvieron mayormente relacionadas a MS en hojas. No se encontraron diferencias estadísticas en MS acumulada por los frutos ni en rendimiento. El T3 fue el tratamiento de mayor absorción de N (381 kg N ha⁻¹), seguido por T2 (333 kg N ha⁻¹) y T1 (289 kg N ha⁻¹), reflejando la cantidad de N disponible para los diferentes tratamientos. La absorción de potasio fue mayor por T3 (697 kg K ha⁻¹), sin presentar diferencias estadísticas respecto a T2 (652 kg K ha⁻¹), ambos absorbiendo más que T1 (515 kg K ha⁻¹). Los periodos de inicio de cultivo mantuvieron niveles de absorción bajos, mientras que los picos se dieron posterior a los 90 DDT debido a la demanda por los frutos, estos fueron los órganos a los que se destinaron mayor cantidad de nutrientes (60% del N y 70% del K). La absorción de N fue mayor en el periodo 120-150 DDT, mientras que la absorción de K logró un pico en el periodo 90-120 DDT. El T1 aun cuando no se realizó aporte alguno de fertilizante logró absorber cantidades importantes tanto de N como de K, demostrando que suelos de similares características son capaces de mantener altas tasas de crecimiento y alcanzar buenos rendimientos sin adición de fertilizantes. La información generada es un insumo clave para planificar la fertilización de los cultivos y la mejora en la gestión del fertirriego, aumentando así la eficiencia de utilización de los nutrientes y contribuyendo a generar sistemas más sustentables.

Palabras clave: curvas; absorción; nitrógeno; potasio; tomate; *Solanum lycopersicum*; invernadero; fertiirrigación; fertilización

8. SUMMARY

Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) is the crop that occupies the largest protected area in Uruguay, with 243 ha according to data from the season 2014/2015 (MGAP. DIEA, 2017) and is the second vegetable in terms of entry into the Mercado Modelo. Crop yields have not increased since the 2002-2003 season (MGAP. DIEA, 2017). These yields are lower than those attainable in the region with similar productive resources and good management. The main yield limiting factors identified for season 2014/15/16 were: potassium nutrition in the first place and nitrogen nutrition for spring and summer crops (Berrueta et al., 2019). In order to improve fertigation management at the farm level, the nitrogen and potassium absorption curves (amounts and moments of absorption) for indeterminate tomato grown in spring/summer under greenhouse conditions in Uruguay were determined in this study. Different levels of nitrogen fertilization (deficient, sufficient and excess) were used. The trial was carried out during spring/summer 2019/20 season at the "Wilson Ferreira" experimental station (INIA, Canelones, Uruguay). Tomato cultivar was Lapataia. The trial consisted in three treatments; T1 without additions of nitrogen and potassium, T2 with addition of 100% of the estimated requirements for nitrogen, potassium, phosphorus, calcium, magnesium and micronutrients, and T3 with addition of 150% of the estimated requirements for nitrogen and 100% of the requirements of the rest of the nutrients. It was observed that T3 was the treatment with the highest accumulation of dry matter with 15694 kg ha⁻¹, followed by T2 and T1 with 15290 kg ha⁻¹ and T1 13124 kg ha⁻¹, respectively. Differences in DM production among treatments were observed from 110 DAT onward and were mainly related to DM in leaves. No statistical differences were found in DM accumulated by the fruits nor in yield. T3 showed the highest N uptake (381 kg N ha⁻¹), followed by T2 (333 kg N ha⁻¹) and T1 (289 kg N ha⁻¹), according to the amount of N available for the different treatments. Potassium uptake was higher for T3 (697 kg K ha⁻¹), without statistical differences with T2 (652 kg K ha⁻¹). T1 presented the lowest K uptake (515 kg K ha⁻¹). At the beginning of growing period nutrients uptake were low and the maximum uptake occurred after 90 DAT due to fruit development. 60% of N and 70% of K were allocated to fruits. N uptake was higher at 120-150 DAT, while K uptake was higher at 90-120 DAT. N and K uptake for T1 were high, even without fertilization, demonstrating that soils with similar characteristics are capable of supply nutrients to maintain high growth rates and high yields. The information generated is key to tomato fertilization planning and improving fertigation management, to increase nutrient use efficiency and contribute to more sustainable systems.

Keywords: curves; absorption; nitrogen; potassium; tomatoes; *Solanum lycopersicum*; greenhouse; fertigation; fertilization

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Berrueta, C.; Borges, A.; Giménez, G.; Dogliotti, S. 2019. On-farm diagnosis for greenhouse tomato in south Uruguay: explaining yield variability and ranking of determining factors. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 110: 125932. Consultado ago. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125932>
2. _____.; Heuvelink, E.; Giménez, G.; Dogliotti, S. 2020a. Estimation of tomato yield gaps for greenhouse in Uruguay. (en línea). *Scientia Horticulturae*. 265: 109250. Consultado ago. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109250>
3. _____.; Dogliotti, S.; Giménez, G. 2020b. Horticultural systems based on greenhouse tomato in south Uruguay: characterization and analysis of economic efficiencies. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 24(2): 87. Consultado ago. 2020. Disponible en http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S2301-15482020000202301&script=sci_abstract&tlng=en
4. Bertsch, F. 2009. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 308 p.
5. Betancourt, P.; Pierre, F. 2013. Extracción de macronutrientes por el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. var. Alba) en casas de cultivo en quíbor, estado lara. *Bioagro*. 25(3): 181 - 188.
6. Bugarín, R.; Galvis, A.; Sánchez, P.; García, D. 2002. Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra Latinoamericana*. 20(4): 401 - 409.
7. Ciampitti, I. A.; García, F. O. 2007. Requerimientos nutricionales: absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. (en línea). *Archivo Agronómico*. no. 12: 1 - 4. Consultado 22 feb. 2020. Disponible en [http://lacs.ipni.net/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/\\$FILE/AA%2012.pdf](http://lacs.ipni.net/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/$FILE/AA%2012.pdf)
8. Dogliotti, S.; García, M. C.; Peluffo, S.; Dieste, J. P.; Pedemonte, A. J.; Bacigalupe, G. F.; Scarlato, M.; Alliaume, F.; Álvarez, J.; Chiappe, M.; Rossing, W. A. H. 2014. Co-innovation of family farm systems: a systems approach to sustainable agriculture. (en línea). *Agricultural Systems*. 126: 76 - 86. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.009>
9. _____.; Colnago, P. 2017. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos hortícolas Tomate (*Lycopersicum*

- sculentum), Papa (*Solanum tuberosum*) y Cebolla (*Allium cepa*).
Montevideo, Facultad de Agronomía. 94 p.
10. Evans, L. T.; Fischer, R. A. 1999. Yield potential: its definition, measurement and significance. (en línea). *Crop Science*. 39(6): 1544 - 1551. Consultado may. 2022. Disponible en <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2135/cropsci1999.3961544x>
 11. FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations, IT). 2017. Soil organic carbon: the hidden potential. (en línea). Roma. 77 p. Consultado nov. 2022. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i6937e.pdf>
 12. Fischer, R. A.; Edmeades, G. O. 2010. Breeding and cereal yield progress. (en línea). *Crop Science*. 50: 85 - 98. Consultado jun. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0564>
 13. Gastal, F.; Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*. 53(370): 789 - 799.
 14. Gianquinto, G.; Muñoz, P.; Pardossi, A.; Ramazzotti, S.; Savvas, D. 2013. Soil fertility and plant nutrition. *In*: FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations, IT). Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops. Roma. pp. 205 - 270.
 15. Greenwood, D.; Stone, D. 1998. Prediction and measurement of the decline in the critical-K, the maximum-K and total cation plant concentrations during the growth of field vegetable crops. *Annals of Botany*. 82(6): 871 - 881.
 16. Guzmán, M. 2004. Población, agua, suelo y fertilizantes: el fertirriego. (en línea). *In*: Guzmán, M.; López, J. eds. Fertirriego: tecnologías y programación en agroplasticultura. Madrid, CYTED. pp. 5 - 10. Consultado jul. 2020. Disponible en <http://repositorio.ual.es/handle/10835/3138>
 17. Heiser, C.; Anderson, G. 1999. New solanums. (en línea). *In*: Janick, J. ed. Perspectives on new crops and new uses. Alexandria, ASHS. pp. 379 - 384. Consultado jul. 2020. Disponible en https://www.growables.org/about_us/credits.htm#NewCropPurdueUniversity
 18. Hernández, M.; Chailloux, M.; Moreno, V.; Mojena, M.; Salgado, J. 2009. Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su efecto en la acumulación

- de biomasa y extracción de nutrientes. *Cultivos Tropicales*. 30(4): 71 - 78.
19. Heuvelink, E.; Dorais, M. 2005. Crop growth and yield. *In*: Heuvelink, E. ed. Tomatoes. Wageningen, Wageningen University. pp. 85 - 144.
 20. Jones, J. B. 1999. Tomato plant culture in the field, greenhouse and home garden. Boca Raton, CRC. 199 p.
 21. Lindhout, P. 2005. Genetics and breeding. *In*: Heuvelink, E. ed. Tomatoes. Wageningen, Wageningen University. pp. 21 - 52.
 22. Lobell, D.; Cassman, K.; Field, C. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*. 34: 179 - 204.
 23. López, L. 2017. Manual técnico del cultivo del tomate: *Solanum lycopersicum*. San José, INTA. 121 p.
 24. Lovenstein, H.; Latinga, E.; Rabbinge, R.; van Keulen, H. 1993. Principles of theoretical production ecology. Wageningen, Wageningen University. 117 p.
 25. Marschner, H. 1997. Mineral nutrition of higher plants. 2nd. ed. London, Academic Press. 889 p.
 26. Martínez, J.; Salinas, L.; Corradini, F. 2017. Nutrición y fertilidad en tomate bajo condiciones de invernadero. *In*: Allende, A.; Salinas, L.; Rodríguez, F.; Olivares, N.; Riquelme, J.; Antúnez, A.; Martínez, J.; Corradini, F.; Sepúlveda, P.; Abarca, P.; Guzmán, A.; Felmer, S. eds. Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. Santiago de Chile, INIA. pp. 20 - 29.
 27. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Encuesta hortícola 2015-2016: zonas sur y litoral norte. (en línea). Montevideo. 18 p. Consultado mar. 2021. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/encuestas-horticolos-2015-2016-zonas-sur-litoral-norte-344>
 28. MGAP. OPYPA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, UY). 2019. Anuario OPYPA 2019. Montevideo. 666 p. Consultado mar. 2021. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2019>
 29. Monsalve, O.; Gutiérrez, J.; Cardona, W. 2017. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas

- enmiendas orgánicas al suelo: una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 11(1): 200 - 209.
30. Nuez, F. 1995. El cultivo del tomate. Bilbao, Mundi-Prensa. 793 p.
 31. Peet, M. 2005. Irrigation and fertilization. *In*: Heuvelink, E. ed. *Tomatoes*. Wageningen, Wageningen University. pp. 171 - 196.
 32. Ringuelet, A.; Bachmeier, O. 2002. Kinetics of soil nitrogen mineralization from undisturbed and disturbed soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33(19-20): 3703 - 3721.
 33. Saravia, F. 2004. Elaboración de curvas de absorción de nutrientes para la variedad de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) Alboran bajo condiciones de invernadero en Zamorano, Honduras. Tesis Ing. Agr. Zamorano, Honduras. Universidad Zamorano. Escuela Agrícola Panamericana. 44 p.
 34. Segura, M.; Contreras, J. 2016. Fertilización adaptada a las necesidades del cultivo: curvas de absorción de nutrientes. Almería, Junta de Andalucía. 13 p.
 35. Sims, W. L. 1980. History of tomato production for industry around the world. *Acta Horticulturae*. no. 100: 25 - 26.
 36. Sonneveld, C. 1997. Mineralenopname bij teelten onder glas. Naaldwijk, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente vestiging Naaldwijk. 35 p. (Intern verslag. Proefstation voor de Bloemisterij en Glasgroente, vestiging Naaldwijk no. 81).
 37. _____; Voogt, W. 2009. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Dordrecht, Springer. 432 p.
 38. Sparks, D.; Huang, P. 1985. Physical chemistry of soil potassium. *In*: Munson, R. D. ed. *Potassium in agriculture*. Madison, ASA. pp. 201 - 276.
 39. Spoturno, J.; Oyhantcabal, P.; Goso, C.; Aubet, N.; Cazaux, S.; Huelmo, S.; Morales, E.; Piñeiro, A.; Martínez, G. 2004. Mapa geológico del departamento de Canelones. (en línea). Montevideo, MIEM. Esc. 1:100.000. Color. Consultado 30 jul. 2020. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/publicaciones/carta-geologica-del-departamento-canelones>
 40. Taylor, I. B. 1986. Biosystematics of the tomato. *In*: Atherton, J.; Rudich, G. eds. *The tomato crop: a scientific basis for improvement*. New York, Chapman and Hall. 34 p.
 41. UAM (Unidad Agroalimentaria Metropolitana, UY). 2019. Anuario estadístico 2019. (en línea). Montevideo. 75 p. Consultado mar. 2021.

Disponible en <http://www.mercadomodelo.net/anuario-estadistico-2019>

42. Van Ittersum, M. K.; Rabbinge, R. 1997. Concept of production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combination. *Field Crop Research*. 52(3): 197 - 208.
43. _____.; Cassman, K. G.; Grassini, P.; Wolf, J.; Tittonell, P.; Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance. *Field Crops Research*. 143: 4 - 17.
44. Voogt, W.; Sonneveld, C. 1997. Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production. In: Goto, E.; Kvrata, K.; Hayashi, M.; Sase, S. eds. *Plant production in closed ecosystems*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. pp. 83 - 102.