

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ANÁLISIS Y JERARQUIZACIÓN DE FACTORES DETERMINANTES
DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE BAJO INVERNÁCULO EN
LA ZONA DE SALTO**

por

Camila Soledad INETTI VOLPI

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2018**

Tesis aprobada por:

Tribunal: -----
Ing. Agr. PhD. Santiago Dogliotti

Ing. Agr. MSc. Carlos Barros

Ing. Agr. MSc. Cecilia Berrueta

Ing. Agr. MSc. Alejandra Borges

Ing. Agr. PhD. Esteban Vicente

Fecha: 15 de mayo de 2018

Autor: _____
Camila Soledad Inetti Volpi

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi gran familia por su apoyo incondicional en toda la carrera, especialmente a mis padres Mónica y Emmanuel y a Gabriel por su apoyo incondicional en todo momento. A mi bisabuela, mi segunda madre.

A mis tutores, Carlos y Santiago, por su apoyo y seguimiento en todo, por su enseñanza y compromiso desde lo profesional pero más aún desde lo humano. A Esteban Vicente por sus buenos aportes. Al equipo del proyecto: Cecilia Berrueta por su ayuda y aporte siempre cuando lo necesite, Alejandra Borges por su gran aporte en la estadística y Mariana Scarlato por su colaboración y buena disposición en todo.

A las veintisiete familias de productores que participaron en las dos zafas de trabajo, nos abrieron las puertas siempre dispuestos a colaborar e interesados en todo. Al personal de horticultura y citricultura de la EEFA, Erramuspe, Da Costa, Hugo y Victor, sin su ayuda desde el primer día hasta el último habrían sido imposibles los logros, siempre entusiastas haciendo de cada momento muy disfrutable. A Beatriz Vignale por su invaluable apoyo y consejos en cada momento. A cada uno de ellos infinitas gracias por acompañarme en esta experiencia única.

Al personal de biblioteca por el constante apoyo en las correcciones y disposición en la búsqueda de material bibliográfico.

A los buenos docentes y compañeros que encontré durante la carrera. Y a los amigos, esa familia que uno elige.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. SITUACIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE EN URUGUAY Y A NIVEL MUNDIAL	3
2.2. EL CULTIVO DE TOMATE.....	6
2.2.1. <u>Descripción botánica y conceptos generales sobre la fisiología del tomate</u>	6
2.3. FORMACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	9
2.4. FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO.....	14
2.4.1. <u>Factores ambientales que inciden en el rendimiento</u>	16
2.4.1.1. Temperatura.....	16
2.4.1.2. Radiación incidente.....	21
2.4.1.3. Humedad relativa.....	26
2.5. ENFOQUE METODOLÓGICO.....	29
2.5.1. <u>Diagnóstico agronómico regional y trabajo en predios de productores</u>	29
2.5.2. <u>Estudio de brecha de rendimiento</u>	34
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	38
3.1. ENFOQUE GENERAL.....	38
3.2. ÁREA DE ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.....	38
3.3. VARIABLES EVALUADAS.....	40
3.3.1. <u>Variables agroclimáticas</u>	40
3.3.2. <u>Manejo del cultivo asociado a factores determinantes del rendimiento</u>	41
3.3.3. <u>VARIABLES relacionadas al crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo</u>	41
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	46

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	47
4.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DE LAS ZAFRAS.....	47
4.2. CUANTIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	50
4.3. EFECTO DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A FACTORES DETERMINANTES SOBRE LOS COMPONENTES DE RENDIMIENTO.....	54
5. <u>CONCLUSIONES</u>	73
6. <u>RESUMEN</u>	75
7. <u>SUMMARY</u>	76
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	77
9. <u>ANEXOS</u>	85

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Evolución de la producción, superficie, rendimiento y número de productores de tomate de mesa protegido en la zona sur y norte del Uruguay.....	4
2.	Estatificación de los predios en estudio según el área de invernáculos y el área de tomate.....	40
3.	Calibres utilizados en la clasificación de las cosechas.....	45
4.	Datos climáticos de las zafras evaluadas.....	47
5.	Análisis de los registros de HR% <50 y >90 dentro de los invernáculos para ambas zafras según el tipo de ciclo.....	48
6.	Estadísticas descriptivas simples para ambas zafras.....	51
7.	Tipos de ciclos de cultivos evaluados.....	52
8.	Rendimientos promedio de ambas zafras y no. de racimos/planta según el tipo de ciclo.....	53
9.	Correlaciones de Spearman entre el rendimiento de los cultivos y los componentes del rendimiento y las condiciones ambientales.....	67
Figura No.		
1.	Evolución de precios (\$) por kg de tomate desde 2015 hasta abril 2018 y promedio entre 2015 y 2017.....	5
2.	Evolución de los ingresos (toneladas) de tomate al mercado desde 2015 hasta abril 2018 y promedio entre 2003 y 2017.....	5
3.	Organografía de la planta de tomate.....	7
4.	Crecimiento de un cultivo de tomate de tipo indeterminado, expresado como acumulación de materia seca (kg m ²) total, en hojas, en tallos y en frutos en un ciclo de cultivo de 110 días desde trasplante.....	9

5. Modelo cualitativo de la formación de rendimiento de un cultivo anual.....	11
6. Descomposición del rendimiento en sus componentes en el cultivo de tomate.....	13
7. Factores que afectan el rendimiento.....	15
8. Factores principales que afectan la formación del rendimiento cultivo de tomate.....	16
9. Intercepción de luz de plantas jóvenes de tomate dispuestas a diferentes densidades de plantas con el fin de variar el índice de área foliar (IAF).....	22
10. Diagrama explicativo del método de diagnóstico agronómico regional (DAR).....	32
11. Diagrama explicativo de variables y relaciones del sistema de cultivo según la metodología DAR.....	33
12. Representación de la brecha de rendimiento explotable.....	36
13. Mapa de ubicación de los predios seleccionados en ambas zafras.....	39
14. Mediciones de componentes de rendimiento en plantas marcadas.....	42
15. Racimos con flores abiertas y con frutos en diferentes estados de madurez.....	42
16. SunScan tipo SS1.....	43
17. Mediciones con el aparato SumScan tipo SS1.....	43
18. Cantero marcado para cosecha.....	44
19. Clasificación y pesaje de la cosecha en los diferentes calibres.....	45
20.. Registros mensuales de temperatura promedio y humedad relativa promedio para la zafra 2016 y 2017.....	49
21. Registros mensuales de radiación promedio diaria (Mj/día) para la zafra 2016 y 2017.....	50
22. Frecuencia de cultivos según rango de rendimientos para las zafras 2016 y 2017.....	51
23. Mapa de análisis de senderos con los componentes de rendimiento y condiciones ambientales para la zafra 2016..	54

24. Mapa de análisis de senderos con los componentes de rendimiento y condiciones ambientales para la zafra 2017..	55
25. Mapa de análisis de senderos con los componentes de rendimiento y condiciones ambientales para ambas zafras juntas..	56
26. Rendimiento (kg/m ²) en función del número de frutos/m ²	57
27. Tamaño de frutos (mm) en relación al no. de frutos/m ²	57
28. Relación entre el rendimiento y el número de racimos por planta para ambas zafras..	58
29. Relación entre el rendimiento y el % de cuajado para ambas zafras.....	60
30. Evolución del % de cuajado en función del racimo para cada tipo de ciclo..61	
31. Evolución del número de frutos/racimo en función del número de racimo para cada tipo de ciclo.....	61
32. Número de frutos por planta en función de la densidad de plantación.	63
33. Relación entre el rendimiento y la densidad inicial para ambas zafra.....	64
34. Rendimiento (kg/m ²) en función de la densidad de plantación..	65
35. Distribución porcentual del número y peso de cada calibre según los tipos de ciclos..	66
36. Radiación PAR diaria promedio (Mj/día) según el % de transmisividad del invernáculo.....	68
37. Relación entre el rendimiento y la PAR interceptada acumulada para ambas zafras.	70
38. Rendimiento en función de la PAR interceptada acumulada según el tipo de ciclo.....	70
39. Relación entre el rendimiento y la fracción de PAR interceptada para la zafra 2016..	72
40. Relación entre el rendimiento y la fracción de PAR interceptada para la zafra 2017.....	72

1. INTRODUCCIÓN

Los rendimientos de los cultivos deben aumentar sustancialmente en las próximas décadas para mantener el ritmo de la demanda mundial de alimentos impulsada por el crecimiento de la población y el ingreso. En última instancia, la capacidad de producción mundial de alimentos estará limitada por la cantidad de tierra y recursos hídricos disponibles y adecuados para la producción de cultivos, y por límites biofísicos para el crecimiento de los cultivos. Se necesita cuantificar la capacidad de producción de alimentos en cada hectárea de tierras de cultivo de forma coherente y transparente para informar las decisiones sobre políticas, investigación, desarrollo e inversión que pretenden afectar el rendimiento futuro de los cultivos y el uso de la tierra, e informar la acción en el terreno de los agricultores locales a través de sus redes de conocimiento. La capacidad de producción de cultivos se puede evaluar estimando el rendimiento potencial y los niveles de rendimiento limitados en agua como puntos de referencia para la producción de cultivos en, respectivamente, condiciones irrigadas y de secano. Las diferencias entre estos niveles de rendimiento teóricos y los rendimientos reales de los agricultores definen las brechas de rendimiento, y el conocimiento preciso espacialmente explícito sobre estas brechas de rendimiento es esencial para guiar la intensificación sostenible de la agricultura (van Ittersum et al., 2013).

La horticultura uruguaya ha seguido un camino de intensificación y especialización de los sistemas de producción en respuesta a retornos económicos decrecientes producto de la disminución de los precios de los productos y el aumento de los costos de producción durante las dos últimas décadas. Estas estrategias mencionadas han aumentado la presión ejercida sobre los recursos naturales ya deteriorados (calidad física y biológica del suelo) y sobre los recursos de capital y mano de obra limitantes. Todo ello llevó a un desequilibrio e inestabilidad en los sistemas hortícolas debido al uso ineficiente de los recursos productivos provocando un aumento en el uso de insumos externos y mayor impacto sobre el ambiente (Dogliotti et al., 2010).

Un punto crítico identificado en relación a la eficiencia productiva de los sistemas hortícolas uruguayos, son los bajos rendimientos comerciales por hectárea producida y por hora de trabajo de los principales cultivos. Además se identificó que existe una gran variabilidad de rendimientos y una relación rendimiento obtenido/alcanzable en la mayoría de los casos menor a 0,5. Estos resultados muestran que hay un espacio importante para mejorar la eficiencia productiva y que es necesario determinar las causas principales de la baja eficiencia con la finalidad de diseñar estrategias para mejorarla (Dogliotti et al., 2010).

El presente trabajo se realiza en el marco de un proyecto FPTA entre INIA y Facultad de Agronomía titulado: Análisis y jerarquización de factores determinantes de las brechas de rendimiento y calidad en los principales cultivos hortícolas del Uruguay; específicamente tomate (de mesa e industria), frutilla, cebolla y boniato en las zonas sur y en el norte en el departamento de Salto.

El objetivo de este trabajo es contribuir a la identificación, análisis y jerarquización de las principales variables que explican las brechas de rendimiento del cultivo de tomate en predios de la zona hortícola de la ciudad de Salto para dos zafra de cosecha (2016 y 2017). También se propone analizar la calidad de la fruta comercial desde el punto de vista del tamaño estudiando la distribución de los calibres en los diferentes sistemas productivos y su relación con las condiciones ambientales de cada zafra de cosecha. Con los resultados obtenidos se pueden brindar herramientas teóricas y prácticas a los productores con el fin de reducir paulatinamente dicha brecha, mejorando el resultado económico y ambiental de las explotaciones y la eficiencia de toda la cadena productiva.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 SITUACIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE EN URUGUAY Y A NIVEL MUNDIAL

Según FAO (2014), el tomate (*Solanum lycopersicum*) se considera el segundo vegetal más importante en el mundo después de la papa, siendo China el mayor productor con 52.722.967 toneladas, seguido por India 18.735.910 ton., Estados Unidos 14.516.060 ton y Turquía con 11.85.0000 ton. La mayor extensión dedicada al cultivo se encuentra en primer lugar en China con 1.001.711 hectáreas, seguido por India que cuenta con 882.030 hectáreas. En relación al rendimiento el mayor valor lo obtiene Holanda con 50,56 kg/m², seguido por Bélgica con 49,9 Kg/m².

El cultivo de tomate en Uruguay se realiza en dos zonas principales, en el noroeste del país; departamentos de Salto (alrededores de la ciudad de Salto y Villa Constitución) y Artigas (Bella Unión y Tomás Gomensoro) y en la zona Sur, principalmente en áreas rurales de Montevideo y en el departamento de Canelones. De acuerdo a los datos obtenidos por la encuesta hortícola (MGAP. DIEA, 2014, 2015) la producción de tomate (de mesa e industria) fue estimada en 35 mil toneladas, y se realiza en 886 productores en 470 ha. El mercado interno se abastece con tomate de mesa para consumo en fresco de producción nacional durante todo el año, representando el 92% de la producción anual, mientras que el restante 8% lo representa el tomate con destino a industria.

Para mantener una oferta continua a lo largo del año se complementa la producción de las dos zonas mencionadas las cuales presentan distintas aptitudes agro-ecológicas y utilizan diversas tecnologías de producción (Dogliotti et al., 2011). La zona noroeste es la principal productora mediante cultivos protegidos bajo invernáculo a contraestación durante otoño, invierno y primavera con una producción de 20 mil toneladas siendo el 57% de la producción total de tomate en una superficie de 156 ha. Como señala en cuadro 1 la zona sur se especializa en la producción de estación en verano y otoño, representando el 35% de la producción total de tomate la que se divide en un 11% a campo y 24% bajo protección. Además incluye la totalidad de la producción de tomate industria la cual se estima en 3 mil toneladas y se realiza a campo. En total la superficie destinada a tomate en el sur son de 314 ha (MGAP. DIEA, 2014, 2015).

Cuadro 1. Evolución de la producción, superficie, rendimiento y número de productores de tomate de mesa protegido en la zona sur y norte del Uruguay.

	2011/2012		2012/2013		2013/2014		2014/2015	
	Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur
Producción (ton)	20273	5825	19044	7705	26195	7970	19942	8537
Superficie (ha)	142	65	138	73	196	75	156	87
Rend. (ton/ha)	143	90	138	106	134	106	128	98
No. productores	206	240	206	236	219	289	213	383

Fuente: elaborado con base en MGAP. DIEA (2008, 2009, 2012, 2013, 2014).

La producción de tomate de mesa es destinada principalmente al mercado interno, con la particularidad que presenta el rubro hortícola de que los precios se fijan por oferta y demanda de producto con lugar físico en el Mercado Modelo en la capital del país.

De acuerdo a la información brindada por el anuario estadístico sobre la distribución anual de ingreso de tomate al Mercado Modelo la misma se ubica en cuarto lugar luego de la papa, banana y mandarina, representando el 6,2% (18.450 ton) del volumen total. En relación al monto bruto el tomate representa el 7,8% (U\$S 22.203.489) ubicándose luego de la banana, papa y mandarina. Los ingresos de tomate al mercado interno presentan una marcada estacionalidad observándose los mayores valores a partir de noviembre, diciembre y enero explicados por la producción de estación en el sur; luego desciende hacia el otoño siendo los menores valores en los meses de invierno donde la oferta proviene del norte (CAMM, 2016).

Como se muestra en las figuras 1 y 2 la evolución de los precios presenta una tendencia contraria a los ingresos en el mercado, registrándose aumentos en base a un promedio desde 2014/junio 2017 a partir de junio y el mayor valor en el mes de setiembre, esto hace que los productores de la zona norte hayan adoptado una nueva estrategia productiva que implica trasplantes en el mes de junio para abastecer dicho periodo. Mientras que los valores comienzan a descender en los meses de verano y principios del otoño debido a un aumento en la oferta asociada al inicio de cosecha de la zona sur sumada a la producción del norte (CAMM, 2017).

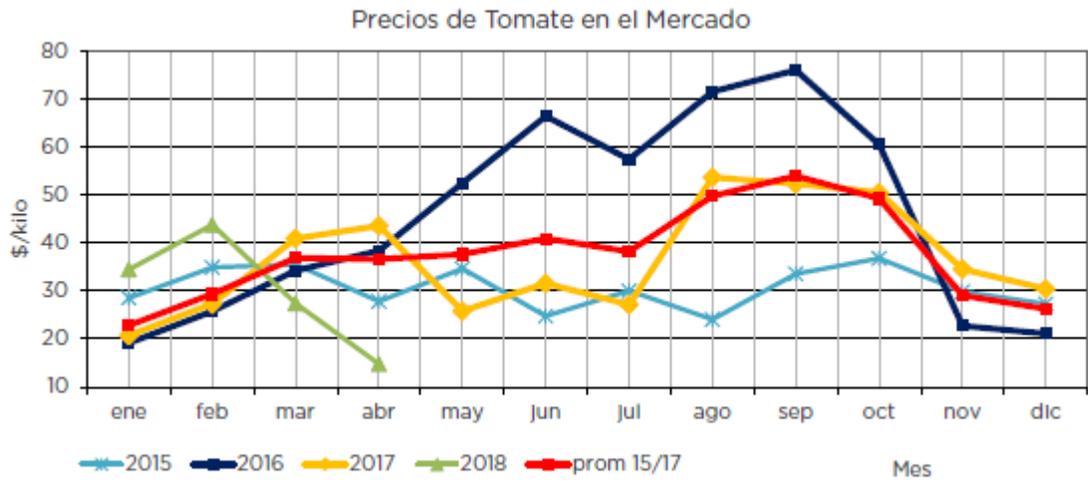


Figura 1. Evolución de precios (\$) por Kg de tomate desde 2015 hasta abril 2018 y promedio entre 2015 y 2017.
Fuente: CAMM (2018).

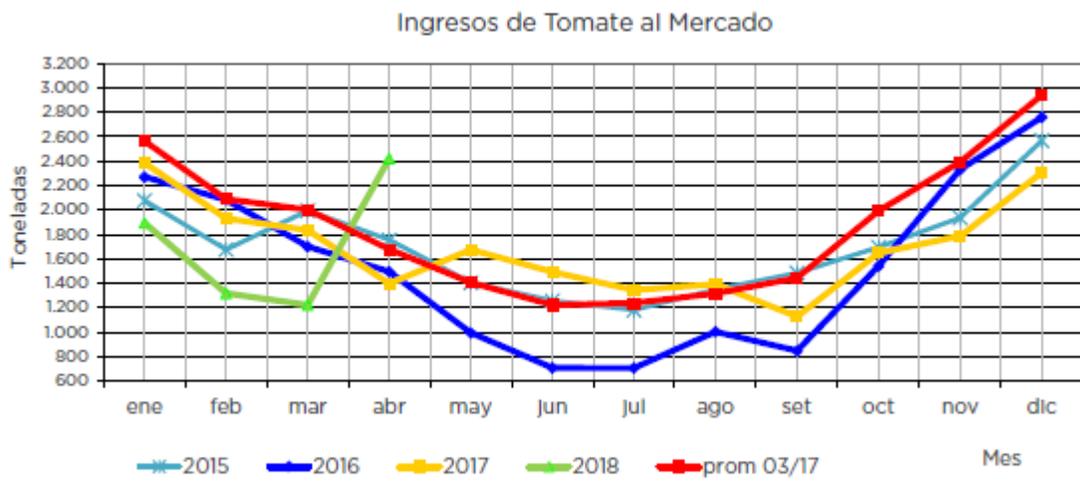


Figura 2: Evolución de los ingresos (toneladas) de tomate al Mercado desde 2015 hasta abril 2018 y promedio entre 2003 y 2017.
Fuente: CAMM (2018).

2.2 EL CULTIVO DE TOMATE

2.2.1 Descripción botánica y conceptos generales sobre la fisiología del tomate

El tomate pertenece a la familia de las Solanaceae, género *Lycopersicum*, subfamilia Solanoideae y tribu Solaneae. La clasificación taxonómica del tomate ha sido ampliamente debatida. En 1753 el botánico sueco Linnaeus lo nombró *Solanum lycopersicum*, pero 15 años más tarde Miller lo sustituyó por *Lycopersicum esculentum* (Taylor, 1986). Aunque los taxonomías han reintroducido recientemente su nombre original, *Solanum lycopersicum* (Heiser y Anderson, 1999), el nombre comúnmente aceptado y todavía válido de *Lycopersicum esculentum* es utilizado. El género *Lycopersicum* es una colección relativamente pequeña de especies constituida por el tomate cultivado *L. esculentum* y las siguientes especies salvajes: *L. esculentum* var. *cerasiforme*, *L. pimpinellifolium* (Jusl.), *L. cheesmannii*, *L. parviflorum*, *L. chmielewski*, *L. hirsutum* Humb., *L. chilense* Dun. and *L. peruvianum* (L.) Mill (Taylor, 1986).

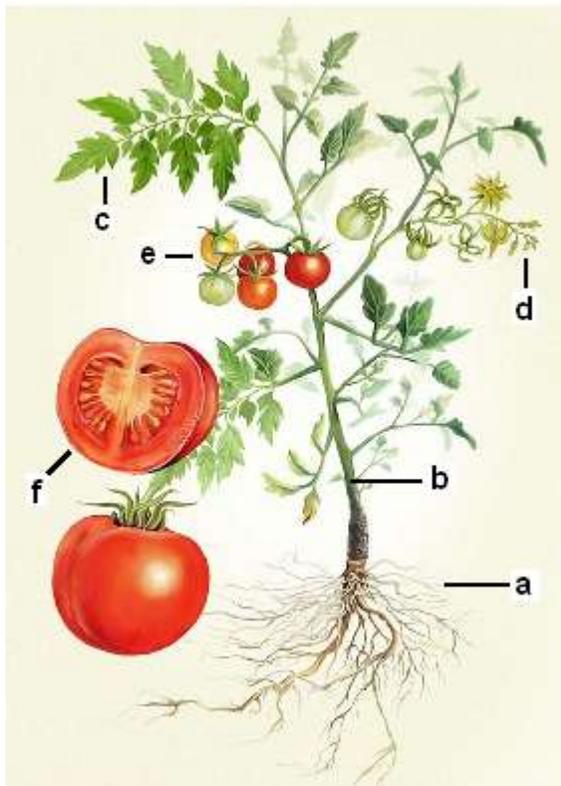
El tomate cultivado es una especie diploide ($2n=24$) y alcanzó su estado actual después de un largo periodo de domesticación y selección de genotipos preferidos por características valiosas, sumado a esto el ser una especie predominantemente endogámica, la variación genética tiende a ser extremadamente limitada (Heuvelink y Costa, 2005c). Muchas de estas especies salvajes mencionada constituyen un recurso fitogenético muy valioso para el mejoramiento genético de la especie cultivada.

El centro de origen del genero *Lycopersicum* se remite a las región andina que incluye parte de Chile, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú (Sims, 1980). Esta región se caracteriza por tener un clima generalmente tropical, pero con bajo nivel de precipitaciones (Dogliotti et al., 2011). El momento y lugar de su domesticación es incierto, pero las evidencias más importantes indican a México. El fruto fue comido por las tribus salvajes de México que lo llamaban "tomati", siendo incuestionable el origen del nombre moderno (Sims, 1980).

El tomate es una planta herbácea de hojas alternas, pinnatisectas y sin estípulas. Es una planta perenne de porte arbustivo que se cultiva como anual (Chamorro, 1995).

La organografía de la planta de tomate se presenta en la figura 3. Presenta inflorescencia en cimas o racimos. Flores actinomorfas, hermafroditas de cáliz gamosépalo y persistente en el fruto; corola gamopétala y de color amarillo; 5 estambres libres y anteras conniventes; gineceo de ovario súpero, bilocular en las especies salvajes y multilocular en tomate cultivado. El fruto es

una baya multiseeminada constituido por una pared carnososa (pericarpio), tejido placentario y semillas. El mismo puede ser bi o plurilocular (Speroni et al., 2010).



a. sistema radical constituido por la raíz principal, las raíces secundarias y las raíces adventicias, b. tallo principal herbáceo, c. hoja simple pinnatisectas, d. inflorescencia en cimas o racimos, e. frutos cuajados en diferentes estados de maduración, f. Fruto baya maduro.

Figura 3. Organografía de la planta de tomate.

Fuente: adaptado de Dal Pozzo (2017).

La planta se inicia desde semilla y es una especie de fácil trasplante por su capacidad de regenerar raíces. Tradicionalmente los almácigos se realizaban en el suelo sobre canteros, pero debido a los altos costos de la semilla es recomendable realizar siembras en recipientes conocidos como “almacigueras” y trasplantar a raíz cubierta con terrón. Ello además asegura que el crecimiento no se interrumpe y se seleccionen plantines sanos al llevarlo a su lugar definitivo (Aldabe, 2000).

Cuando la planta crece directamente de la semilla desarrolla una raíz principal potente que le permite adaptarse a ecosistemas desérticos, pero cuando la raíz principal se daña debido al trasplante, se desarrolla un sistema de raíces laterales adventicias. En este último caso el 70% de las raíces se localizan a menos de 20 cm de la superficie (Chamarro, 1995).

La germinación de la semilla se ve afectada por condiciones ambientales como ser el contenido de agua y de sales del sustrato utilizado.

Las semillas del tomate germinan en óptimas condiciones en potenciales de agua de un 50-75% de la capacidad del campo. Los altos niveles de sal han demostrado disminuir la germinación, aunque parece ser más tolerantes a condiciones salinas durante la germinación que durante el crecimiento subsecuente (Heuvelink y Costa, 2005c). El rango de temperaturas para la germinación de la semilla se encuentra entre 15 a 25°C, aunque el óptimo se encuentra cercano a los 20°C y 25°C (Thompson, 1974).

En relación al crecimiento del tomate luego de la emergencia la planta desarrolla un solo tallo, produciendo entre 7 y 11 hojas antes de que la yema apical se transforme en una inflorescencia terminal de tipo racimo. El crecimiento continúa a partir de las yemas axilares las cuales producen ramas de la misma forma. Existen dos tipos de hábitos de crecimiento en el tomate: “determinados” e “indeterminados”. En cultivares con hábito indeterminado el crecimiento subsiguiente a la diferenciación del primer racimo se produce a partir de la yema axilar de la hoja más joven la cual desplaza lateralmente la inflorescencia. Los sucesivos segmentos del tallo se desarrollan de forma similar, produciendo inflorescencias internodales cada 3 hojas, lo que se conoce como crecimiento simpodial. Estos cultivares son los utilizados para la producción de tomate de mesa en invernáculos o a campo, donde es necesaria su conducción debido a su hábito rastrero.

Por otro lado los cultivares determinados presentan una fuerte brotación de yemas axilares, donde los segmentos sucesivos del eje principal soportan un número inferior de hojas y terminan en una inflorescencia dando lugar a un típico hábito arbustivo. Estos cultivares tienen como principal destino la industria o con un doble propósito (industria y consumo en fresco, Picken et al. 1986, Chamorro 1995).

Los cultivares de hábito indeterminado son los estudiados en este trabajo y por ende van a ser el centro de análisis. El tomate como especie a diferencia de muchos otros cultivos (p.ej. cereales) no detiene el desarrollo y crecimiento vegetativo (área foliar, tallo, raíces) una vez iniciada la etapa reproductiva (floración, cuajado y crecimiento de frutos), y particularmente los de tipo indeterminado, mantienen de forma simultánea a lo largo de todo el ciclo de cultivo el crecimiento de follaje y de los frutos. Lo anterior se puede observar en la figura 4, donde en la medida que va aumentando el número de frutos en crecimiento, debido a la aparición escalonada de los racimos, la proporción del crecimiento total de la planta que corresponde a los frutos va aumentando (Dogliotti et al., 2011).

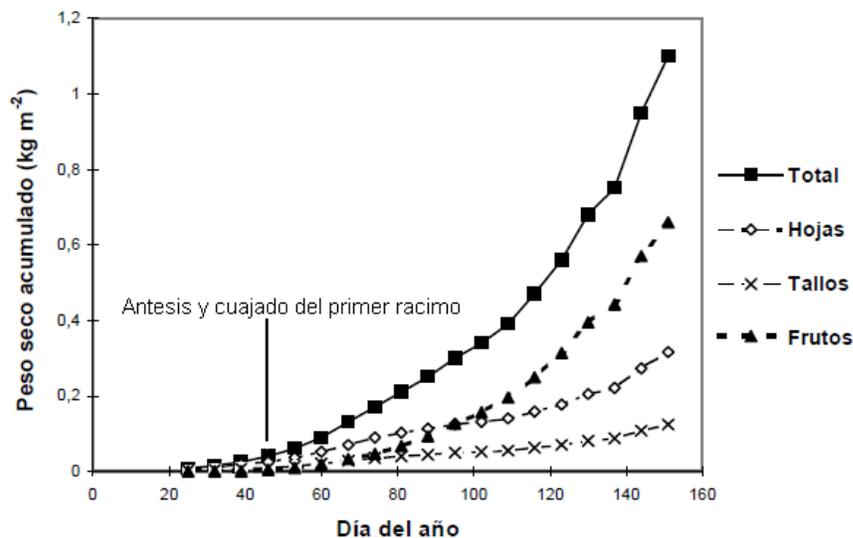


Figura 4. Crecimiento de un cultivo de tomate de tipo indeterminado, expresado como acumulación de materia seca (kg m^{-2}) total, en hojas, en tallos y en frutos en un ciclo de cultivo de 110 días desde trasplante. Fuente: Dogliotti et al. (2011).

2.3 FORMACIÓN DEL RENDIMIENTO

Con la finalidad de estudiar la formación del rendimiento en el cultivo de tomate se analiza el modelo cualitativo de rendimiento citado por Lovenstein et al. (1993) y adaptado por Dogliotti et al. (2011). De acuerdo con lo que establece el mismo, la fijación de CO_2 del aire en un día determinado (asimilación bruta, $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$) depende de la tasa fotosintética (TAB, $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), la cual a su vez depende de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y la eficiencia con que usa esa radiación en el proceso de fotosíntesis. La cantidad de radiación interceptada depende del IAF y la arquitectura foliar del cultivo, y por supuesto de la cantidad de radiación incidente. La eficiencia con que usa esa radiación depende de la temperatura, disponibilidad de agua y CO_2 , estado nutricional y sanitario 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 denomina respiración de mantenimiento (RM). La asimilación neta ($\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$) es la cantidad de azúcares simples remanente luego de las pérdidas en respiración de mantenimiento, es lo que el cultivo puede usar para

la producción de nuevas estructuras vegetales o para el almacenamiento de reservas, es decir, para el crecimiento.

Se conoce como “fuente” a la cantidad de asimilados disponibles por día para el crecimiento del cultivo y “fosa” a los distintos órganos vegetales que demandan asimilados para su crecimiento. Dicha fuente se distribuye entre las fosas (partición) de forma diferente según el estado de desarrollo del cultivo a lo largo del ciclo fenológico. Además cada órgano en cuestión puede utilizar unidades diferentes de materia seca para producir una unidad de glucosa, lo que se conoce como factor de conversión ($FC, gMS.gCH_2O^{-1}$).

Según lo planteado por Dogliotti et al. (2011) existen dos alternativas para incrementar el rendimiento del cultivo de tomate. Por un lado, se pueden adoptar medidas de manejo para incrementar la tasa de asimilación bruta (TAB), disminuir la respiración (RM) y por lo tanto aumentar la tasa de asimilación neta (TAN), o sea la cantidad de asimilados disponibles para el crecimiento de todo el cultivo. Por otro lado, se pueden tomar medidas para maximizar la partición de esos asimilados hacia los frutos y así incrementar el índice de cosecha de los mismos. Pero ambos mecanismos no son independientes, sino que como muestra la figura 5, existe una retroalimentación positiva entre la partición de asimilados a las hojas y la TAB a través del índice de área foliar (IAF). Es decir, si a través del manejo se incrementa la partición de asimilados a los frutos la cantidad de asimilados que se dirigen al crecimiento de las hojas no son suficientes para reponer las hojas que van senesciendo, lo que disminuiría la TAB futura pudiendo en muchos casos finalizar antes el ciclo del cultivo.

En esta misma línea Dogliotti et al. (2011) señalan que el manejo de la partición de asimilados entre el crecimiento vegetativo y crecimiento de los frutos es un punto clave para alcanzar el largo de ciclo planificado para lograr los objetivos productivos con el fin de llegar a altos rendimientos.

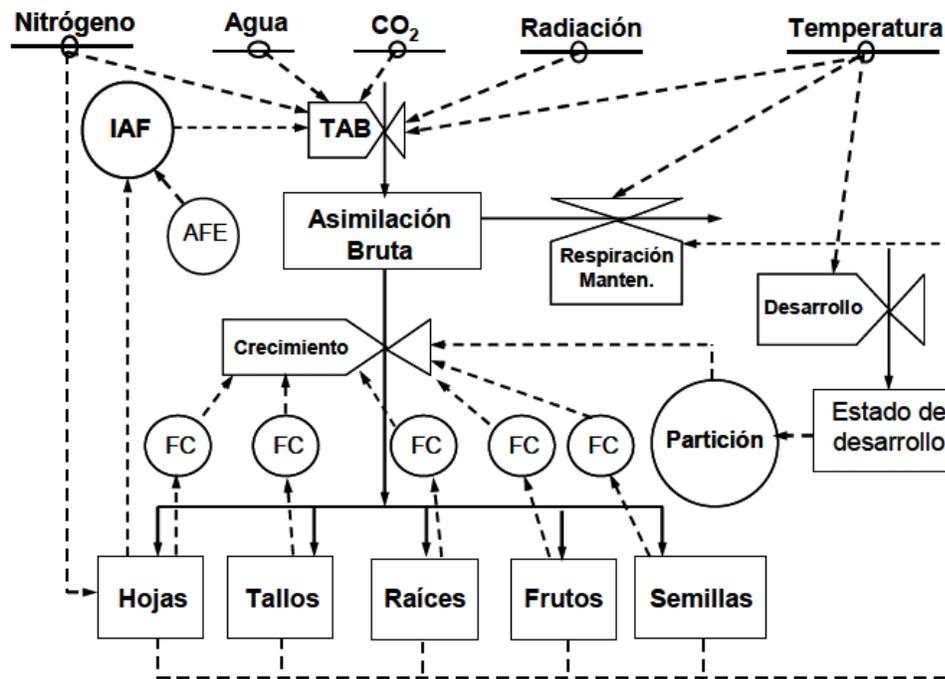


Figura 5. Modelo cualitativo de la formación de rendimiento de un cultivo anual. Fuente: Dogliotti et al. (2011).

Diversos trabajos han estudiado la dinámica y relación entre la distribución de la materia seca entre el crecimiento vegetativo y reproductivo de las plantas, concepto conocido como partición de la materia seca (Lovenstein et al. 1993, De Koning 1994, Heuvelink 1996, Marcelis 1996).

Este concepto de partición es el resultado final de un conjunto coordinado de procesos metabólicos y de flujo de los asimilados desde los órganos fuentes hacia los órganos fijas a través de las vías de transporte (floema). La partición de materia seca entre las distintas fijas está regulada por las mismas fijas y la capacidad competitiva de un órgano para acumular o consumir asimilados en un determinado periodo de tiempo, esto último llamado fuerza de fisa (Marcelis, 1996).

Estudios realizados por Heuvelink (1996) sobre la validación de un modelo de simulación sobre la dinámica de la partición de materia seca en tomate demuestra que existe relación entre la partición medida y simulada en experimentos de raleo de fruta, en base al supuesto de que la fuerza de fisa de los racimos es proporcional al número de frutos por racimo.

La partición de la materia seca a los frutos varía a lo largo del ciclo de cultivo, donde después del cuajado del primer racimo la fracción de la materia

seca a los frutos aumenta rápidamente, a medida que aumenta el número de frutos creciendo en la planta. Aproximadamente 100 días después del trasplante la partición a los frutos se estabiliza entre 0,6 y 0,7 llegando a un punto de equilibrio. Esto último se debe a que en ese momento se inicia la cosecha de los frutos maduros del primer racimo y de forma simultánea existen nuevos frutos que cuajan en racimos cercanos al ápice, debido a esto la cantidad de frutos que hay en la planta creciendo se mantiene aproximadamente constante (Dogliotti et al., 2011).

Asociado a la partición de materia seca a los frutos, Heuvelink (1996) señala que existe una sobre-estimación de la fuerza de fosa de los racimos si se asume una misma fuerza de fosa para todos los frutos del racimo, debido a que mediciones en racimos con 9 ± 11 frutos se observó un peso potencial menor en las frutas distales en el racimo.

La fuerza de fosa de un órgano se cuantifica a través de la tasa de crecimiento potencial es decir la tasa de crecimiento cuando la disponibilidad de asimilados no es limitante. Dicha tasa de crecimiento potencial de los diferentes órganos no es estática, sino que cambia dinámicamente a lo largo del ciclo de desarrollo del órgano y también es afectada por la temperatura. Para varios cultivos se ha demostrado que la partición de materia seca que recibe cada órgano fosa es proporcional al cociente entre las fuerzas de fosa de cada uno y la fuerza de fosa total de la planta (Marcelis, 1996).

Basándose en lo anterior Heuvelink (1996) presenta la validación de un modelo para la simulación de la dinámica en la distribución de materia seca entre las partes reproductivas y vegetativas de la planta de tomate bajo invernadero. Sin embargo sostiene que, la aplicabilidad del modelo sigue siendo limitada siempre que el número de frutos por racimo no se simula, debido que en condiciones de baja relación fuente-fosa el aborto de fruta es un mecanismo importante de retroalimentación en el crecimiento de las plantas.

En el corto plazo, el rendimiento será alto cuando gran parte de los asimilados se repartan a los frutos, pero el crecimiento vegetativo puede entonces volverse demasiado bajo para mantener la capacidad fotosintética del cultivo y, en consecuencia el rendimiento futuro se ve afectado adversamente. Por lo tanto, el rendimiento máximo a largo plazo es solo obtenido a través de un equilibrio adecuado entre crecimiento vegetativo y reproductivo (De Koning, 1994).

Según Heuvelink y Dorais (2005a) el rendimiento de un cultivo de tomate está determinado por la producción total de biomasa, la partición de la biomasa entre los diferentes órganos y el contenido de materia seca de la fruta. Además de afectar la producción del cultivo, estos atributos influyen en la

calidad del producto (tamaño, sabor y aroma de la fruta) y por ende en el precio final del mismo.

En la figura 6 se descompone el rendimiento del cultivo de tomate en sus distintos componentes. Existen componentes que están directamente determinados por decisiones de manejo como ser la densidad de plantación, el número de frutos por racimo (en el caso que se realice raleo de fruta) o el largo del ciclo de cultivo. Por otro lado existen otros componentes determinados por condiciones ambientales como ser la temperatura media y su relación con la tasa de aparición de racimos, el largo del período de crecimiento de fruto y del ciclo del cultivo y el cuajado de los frutos. La relación fuente/fosa es una medida de disponibilidad de asimilados y determina la cantidad de frutos que cuajan por racimo. Tanto el número de frutos por racimo como la temperatura influyen en la partición de asimilado promedio al fruto (Dogliotti et al., 2011).

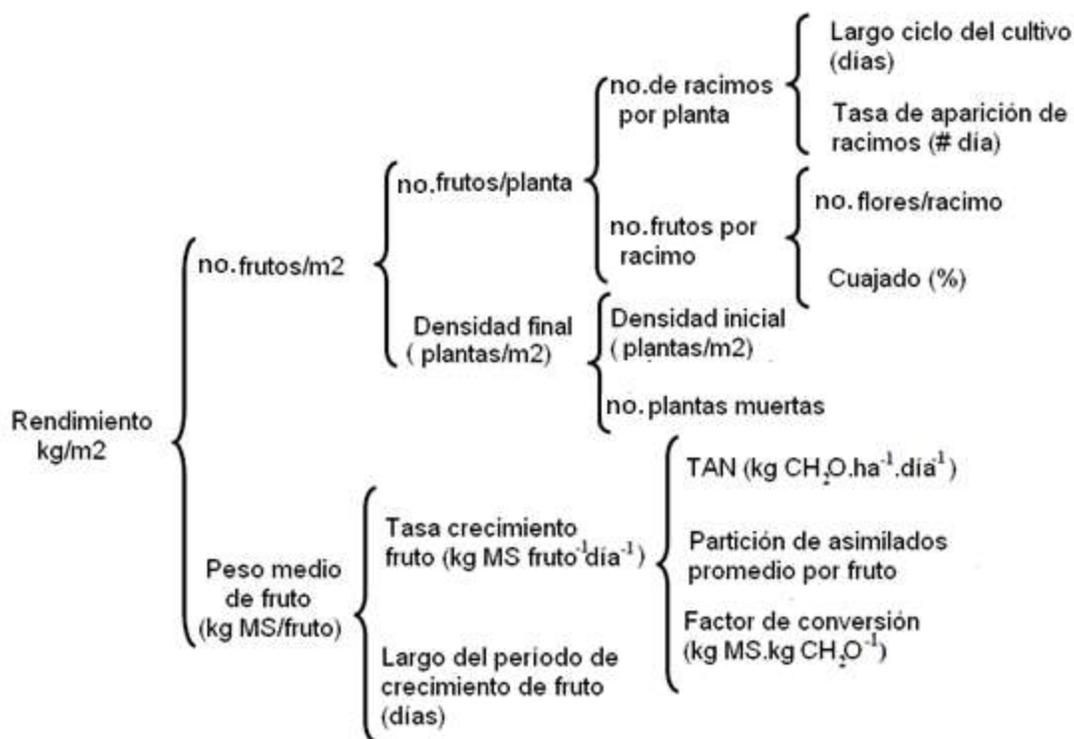


Figura 6. Descomposición del rendimiento en sus componentes en el cultivo de tomate.

Fuente: adaptado con base en Dogliotti et al. (2011)

2.4 FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO

Según plantea Lovenstein et al. (1993) en la figura 7 los factores que afectan el rendimiento de los cultivos pueden dividirse en tres niveles reflejando situaciones productivas según el nivel de rendimiento sobre el que inciden.

En primer lugar, el rendimiento potencial está afectado por factores determinantes como ser la radiación incidente, la temperatura y humedad relativa, y las características del cultivo asociadas al genotipo (variedad). Las condiciones de crecimiento para obtener el rendimiento potencial de un cultivo se realiza bajo condiciones intensivas de cultivo, ya sea en campos experimentales o bajo invernáculos (Lovenstein et al., 1993).

El crecimiento de los cultivos muestra una respuesta retardada a los factores climáticos (esencialmente con respecto al crecimiento del área foliar), además de la respuesta inmediata a través de la fotosíntesis. Por ejemplo, el crecimiento de los cultivos puede aumentar a mayor temperatura en el largo plazo, ya que el aumento de la temperatura puede incrementar el área foliar específica y la tasa de desarrollo de la misma, lo que da como resultado mayor interceptación de luz en un futuro. Del mismo modo, la respiración de mantenimiento responde de inmediato a la temperatura, pero dado que también está relacionado con la cantidad de biomasa, la tasa de respiración de mantenimiento en un momento dado también depende de los factores ambientales definiendo la cantidad de materia seca acumulada (Heuvelink y Dorais, 2005a).

En segundo lugar, el rendimiento alcanzable es limitado por la disponibilidad de agua y nutrientes, y sus manejos asociados. Esto último refiere en relación a los nutrientes minerales a los momentos y dosis de aporte de los diferentes elementos (macro y micronutrientes), 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) y 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 2005a).

Finalmente, el rendimiento real está definido por factores reductores como ser la ocurrencia de enfermedades, presencia de plagas y malezas.

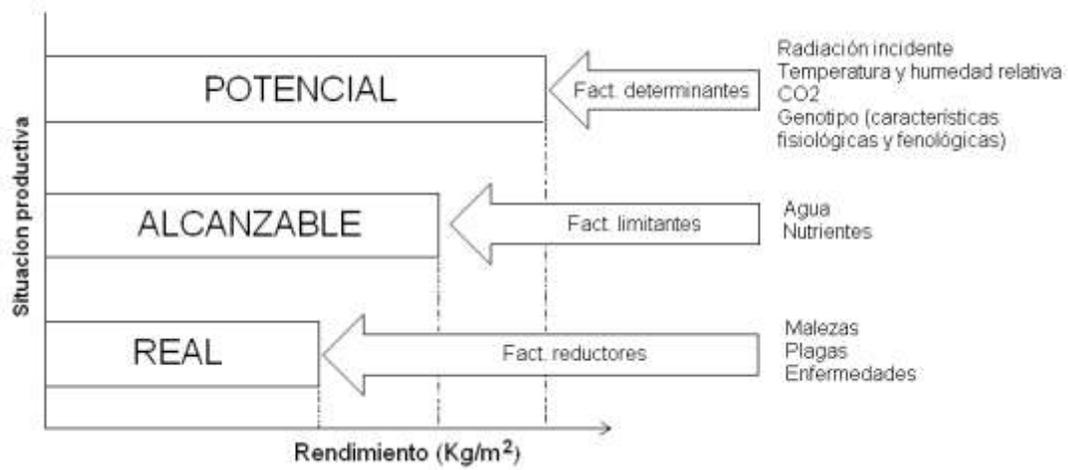


Figura 7. Factores que afectan el rendimiento. Fuente: adaptado con base en Lovenstein et al. (1993).

Con respecto a lo anterior, el desarrollo de las plantas depende de numerosos factores, pudiéndolos dividir en factores ambientales o climáticos (radiación incidente, temperatura, humedad relativa, etc) y los que refieren al manejo agronómico del cultivo (densidad y marco de plantación, fecha de trasplante, manejo de la planta como deshoje, desbrote, raleo, capado, variedad utilizada). Pero todos estos factores mantienen fuertes interacciones en la formación del rendimiento del cultivo de tomate representados en la figura 8. En la misma se representan todos los factores que en cada momento determinan la producción de asimilados o fuente, y luego los factores que determinan en uso de esos asimilados en la planta. Se incluye la interacción entre el uso y la producción de asimilados a través del índice de área foliar (m^2 hoja/ m^2 suelo), y la importancia de la relación fuente/fosa en la disponibilidad de asimilados en la regulación del número de fosas en la planta, y por lo tanto en la partición con un efecto de largo plazo (Dogliotti et al., 2011).

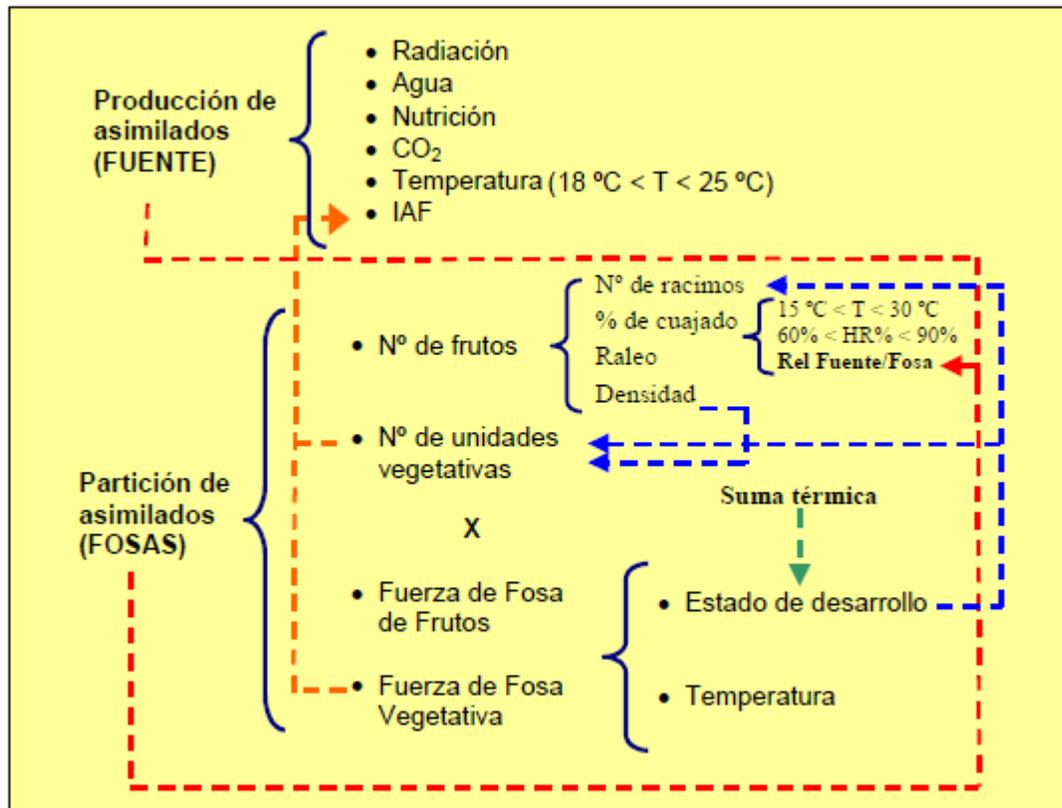


Figura 8. Factores principales que afectan la formación del rendimiento en el cultivo de tomate.

Fuente: Dogliotti et al. (2011).

2.4.1 Factores ambientales que inciden en el rendimiento

2.4.1.1 Temperatura

El tomate es una planta termo periódica, la cual crece en mejor condiciones con temperaturas variables que constantes que varía con la edad de la planta. Las diferencias térmicas noche/día de 6 a 7°C son óptimas (Castilla, 1995).

La temperatura tiene un efecto importante sobre el desarrollo vegetativo de la planta. El valor óptimo depende de la iluminación y se encuentra alrededor de los 25°C. Los efectos de la termoperiodicidad, o se del empleo de un régimen de temperaturas nocturno inferior al diurno, no son concluyentes. Cuando las temperaturas diurnas son elevadas, un descenso en la temperatura

nocturna puede ser beneficioso, pero cuando la temperatura diurna se mantiene a niveles subóptimos, la elevación por la noche favorece el desarrollo vegetativo (Picken et al., 1986).

La tasa de aparición de hojas, o la tasa de despliegue de hojas (LUR), no es necesariamente igual a la tasa de inicio de primordios foliares en el ápice pero, a largo plazo, esa igualdad es esperada. La tasa de aparición de hojas en el tomate, como en muchos otros cultivos, es predominantemente influenciado por la temperatura. Esto se muestra claramente en el trabajo de De Koning (1994), donde estudió la influencia de la temperatura y otros factores de crecimiento en la tasa de aparición de hojas de tomate. En tipos indeterminados, dado que se inician tres hojas entre dos racimos sucesivos, la tasa de aparición de hojas es simplemente tres veces la tasa de aparición de racimos. En el rango de 17 a 23 ° C esta relación es casi lineal y a 20 ° C se desarrollan tres hojas cada semana; a 17 ° C son 2.5 y a 23 ° C son 3.5 hojas por semana. Por ende un nuevo racimo con una temperatura media de 20°C aparece cada 8-9 días aproximadamente.

El número de hojas formadas entre la aparición de los cotiledones y la primera inflorescencia se redujo cuando las plantas crecieron en condiciones de baja temperatura ambiental durante un periodo de aproximadamente nueve días desde la expansión del cotiledón. Extendiendo el periodo del tratamiento bajo ese régimen térmico no redujo más el número de hojas, pero si aumento el número de flores formadas en la primera inflorescencia. El número de hojas fue mayor en las plantas que crecieron en invierno cuando la duración del día fue más corta y la intensidad de la luz más baja. Además no existen mayores diferencias en el número de hojas entre plantas que crecieron en un periodo de luz de 8 y 16 horas (Calvert, 1959). Una reducción en la duración de la fase vegetativa puede contribuir en un adelanto en la producción de fruta. Por el contrario, si se extiende la fase vegetativa inicial, puede permitir una mayor producción de flores y frutos, además de un desarrollo de área foliar mayor que permita soportar dicho crecimiento reproductivo (Atherthon y Harris, 1986).

La planta de tomate no responde al fotoperiodo para florecer. La diferenciación floral suele iniciarse dentro de las tres semanas siguientes a la expansión de los cotiledones. Tanto el momento de iniciación de la primera inflorescencia, como el estadio de crecimiento al cual se produce la primera iniciación, pueden ser afectados por los tratamientos ambientales dados a la planta poco tiempo después de la emergencia del brote. La fase sensible dura normalmente nueve días desde la expansión de los cotiledones. Durante esta fase hay una interacción entre la temperatura y la iluminación tal que, a temperaturas bajas, se favorece la formación de flores en plantas cultivadas con una iluminación baja (250 luxes/pie²). Por ejemplo, una temperatura de 15°C

puede adelantar la floración 14 días respecto a las plantas cultivadas a 25°C. Cuando la radiación incidente es mayor (1000 luxes/pie²) la diferenciación del primer racimo se da antes (11 días) pero con más hojas diferenciadas (11 hojas) a 25°C que a 15°C (15 días y 9 hojas, Calvert, 1959).

Con respecto a lo anterior se concluye que el efecto de la temperatura es distinto según la cantidad de radiación incidente. Por ende cuando es baja la radiación el efecto de la temperatura se explica por su efecto sobre la fuerza de fosa de la planta. La tasa potencial de crecimiento de la planta a 25°C es mucho mayor que a 15°C, pero la fuente en condiciones en que la fotosíntesis está limitada por la falta de radiación no cambia significativamente, por lo tanto la relación fuente/fosa en condiciones de baja radiación incidente es mucho menor a mayor temperatura y esto retrasa la diferenciación del primer racimo. Este problema a nivel práctico conlleva a la pérdida de precocidad ya que reduce el número de racimos que se pueden obtener antes de que la planta llegue al alambre o tope de la estructura de conducción (Dogliotti et al., 2011). Estos resultados demuestran la importancia de reducir la temperatura cuando las intensidades de luz son bajas, mientras que por otro lado, cuando las intensidades de luz son óptimas reducir la temperatura tendría menos efecto en el número de hojas pero puede retardar seriamente la tasa de crecimiento de la planta (Calvert, 1964).

Otro facto asociado a la floración que es afectado por las condiciones ambientales especialmente la temperatura es el número de flores iniciadas en la primera inflorescencia. Las temperaturas bajas promueven la ramificación de las inflorescencias; así, por ejemplo, las plantas cultivadas a 16°C pueden producir cuatro veces más flores que las que se mantienen a 24°C. Este efecto es más acusado en verano, cuando la iluminación es alta, que en invierno cuando es escasa (Aung, 1976). El número de flores formadas en las siguientes inflorescencias resulta afectado por las condiciones de desarrollo posterior de la planta (Chamorro, 1995). La temperatura tiene una importancia fundamental en la velocidad de desarrollo de las flores después de su iniciación. Así, flores se desarrollan más deprisa a mayor temperatura y además promueve una floración más temprana de las siguientes inflorescencias (Calvert, 1964). Pero aunque las temperaturas elevadas aceleran generalmente el desarrollo floral, pueden aumentar la incidencia del aborto de yemas cuando la radiación fotosintéticamente activa está limitando severamente el crecimiento de la planta (Chamorro, 1995).

El porcentaje de cuajado: $\text{no. de flores cuajadas} / \text{no. flores totales} * 100$; es afectado por factores internos de la planta y por el ambiente. Condiciones de temperatura menores a 15°C o superiores a 30°C y condiciones de humedad relativa menores 60% o mayores a 90% en los días cercanos a la anthesis

disminuyen el porcentaje de cuajado debido a que se dificulta la polinización y disminuye la viabilidad del polen (Dogliotti et al., 2011). De estas dos últimas la polinización es la causa más frecuente de bajo porcentaje de cuajado. La temperatura óptima para la germinación del grano de polen es de 21°C, en la medida que nos alejamos de esa condición tanto la germinación como el desarrollo del tubo polínico se ralentizan (Chamorro, 1995).

Pero es importante mencionar que el factor más importante que determina el porcentaje de cuajado es la disponibilidad de asimilados en la planta, la cual se representa a través de la relación fuente/fosa (Dogliotti et al., 2011).

En la práctica, las condiciones ambientales son una causa frecuente de los fallos en la fecundación. En los invernaderos, cuando la iluminación es suficiente y las temperaturas moderadas, la polinización y fecundación son óptimas para mantener una producción adecuada. No obstante, la baja iluminación en invierno y las temperaturas inferiores a 10°C pueden causar serios problemas en ambos procesos. Estos problemas pueden atenuarse notablemente utilizando técnicas de vibración de flores, que favorecen la polinización, o bien mediante el empleo de variedades partenocárpicas o con polen fértil a bajas temperaturas. Además una práctica común son las pulverizaciones dirigidas al racimo de flores con auxinas u otros promotores de crecimiento, con el fin de inducir el desarrollo partenocárpico posibilitando la producción de frutos a lo largo de todo el año. En estos casos es frecuente que los frutos posean pocas o ninguna semilla y peor textura y color. En verano, en los invernaderos insuficientemente ventilados, pueden alcanzarse temperaturas superiores a 40°C, lo que puede repercutir en la viabilidad de los óvulos y en la producción de polen (Chamorro, 1995).

De Koning (1994) mediante un experimento donde se ralearon cuatro plantas para dejar hasta dos frutas por racimo y cuatro tratamientos de temperatura (17, 19, 21 y 23°C), se obtuvo que, a 23°C el raleo aceleró significativamente la tasa de floración pero en los demás tratamientos tuvo un pequeño efecto retardante pero significativo estadísticamente en la floración. Esto señala una interacción significativa ($p=0,019$) de “temperatura x raleo”.

La tasa de crecimiento potencial del fruto varía a lo largo de su ciclo de desarrollo, alcanzando su valor máximo entre 20 y 40 días desde la antesis y luego desciende gradualmente hasta la maduración. La temperatura, en los rangos estudiados por De Koning (1994) entre 17 y 23 °C, acelera la tasa de desarrollo del fruto y por lo tanto a mayores valores se alcanza antes la tasa de crecimiento máxima y la maduración del fruto. Por ende la temperatura es el factor del ambiente que determina el largo del período de crecimiento de fruto, y en la medida que se acorta el mismo por un incremento en la temperatura, el

tamaño potencial disminuye simplemente porque dispone de menos tiempo para crecer. Con todo lo anterior se deduce que el efecto de la temperatura en la fuerza de fosa de un fruto se ejerce a través de la tasa de desarrollo y puede ser representada mediante la acumulación de grados día a lo largo de todo el ciclo de desarrollo del fruto, desde cuajado hasta maduración.

La temperatura también presenta un efecto sobre la fuerza de fosa de un órgano a corto plazo, es decir, las oscilaciones de temperatura que pueden darse en periodos cortos de tiempo (pocos días) modificando la velocidad de las reacciones metabólicas que son aceleradas al aumentar la temperatura. Un experimento realizado por De Koning (1989) donde se evaluaron plantas al inicio y final del mismo de forma destructiva para medir los cambios en materia seca acumulada total, en tallos, hojas y frutos; de un grupo de plantas que desde el trasplante hasta la antesis del sexto racimo crecieron a una temperatura promedio de 19°C luego se dividieron en dos grupos. Un grupo continuó creciendo a la misma temperatura promedio y el otro paso a un régimen térmico de 23°C promedio. Los resultados obtenidos señalan que no hubo diferencia significativa en el crecimiento total de las plantas de ambos grupos, lo que indica que no hubo incidencia de la temperatura en la TAN ya que entre 19 y 23°C es un rango óptimo para las especies con metabolismo C3 como ser el tomate. Donde sí se encontraron diferencias significativas es en cómo se distribuyeron los asimilados en la planta. Al incrementar la temperatura de 19 a 23°C la partición de asimilados entre frutos y partes vegetativas aumento, con mayor efecto en la fuerza de fosa de los frutos que en la fuerza de fosa vegetativa. Este mayor impacto de la fuerza de fosa de los frutos se explica ya que al inicio del experimento las plantas tenían seis racimos con aproximadamente 25-30 frutos cuajados creciendo en la planta, contra una cantidad inferior de fosas vegetativas.

La mayor demanda de asimilados por parte de los frutos en situaciones de altas temperaturas no solo reduce el crecimiento vegetativo sino que reduce el crecimiento de los nuevos frutos y muchas veces provoca aborto de flores. Esta disminución del área foliar por planta al bajar la partición de asimilados al crecimiento de follaje es lenta de recuperar comparado con perder un par de racimos por problemas de cuajado (Dogliotti et al., 2011).

Esto último debido a una menor relación fuente/fosa en la medida que no hay diferencias importantes en la TAN y si un aumento importante de la fuerza de fosa de toda la planta. Como consecuencia del aborto de flores y una pobre carga de frutas frente a esta situación luego de un tiempo la fuerza de fosa total de los frutos disminuye y la planta puede recuperarse vegetativamente y se pueden desarrollar flores sanas. Subsecuentemente, estas flores desarrollaran una fuerza de fosa mayor resultando en un ciclo de

mayor crecimiento de fruto. En este camino será más o menos pronunciada la alternancia entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo (De Koning, 1989). En muchos casos puede ser determinante el hecho de no lograr un equilibrio reproductivo/vegetativo de la decisión de eliminar el cultivo e iniciar uno nuevo, ya que en estructuras costosas como son los invernáculos no es conveniente mantener un cultivo de baja productividad. Además las oscilaciones de carga de frutos en la planta son indeseables ya que provocan variaciones importantes semanalmente en la cantidad de frutos a cosechar. Esto presenta dos ventajas importantes: irregularidad en el abastecimiento al mercado y problemas para planificar el uso de la mano de obra (Dogliotti et al., 2011).

La velocidad de desarrollo del fruto resulta marcadamente afectada por la temperatura influyendo en la respiración y síntesis de almidón y, en consecuencia en la velocidad de importación de asimilados. La temperatura nocturna óptima para el fruto se sitúa en el intervalo de 15-20°C. Durante la maduración, también afecta la velocidad de síntesis de pigmentos y la insolación directa puede provocar una coloración irregular al afectar localmente la temperatura del fruto (Chamorro, 1995).

Las temperaturas por debajo de lo óptimo favorecen en las frutas grandes forma irregular con carpelos separados y placenta expuesta. Las bajas temperaturas nocturnas (12°C) retrasan la maduración de la fruta y aumentan la susceptibilidad de la planta a la malformación de la fruta en punta, que está asociada con lóculos deformados (es decir, retrasada o ausente la placenta y ausencia de semillas, Saltveit 1993).

2.4.1.2 Radiación incidente

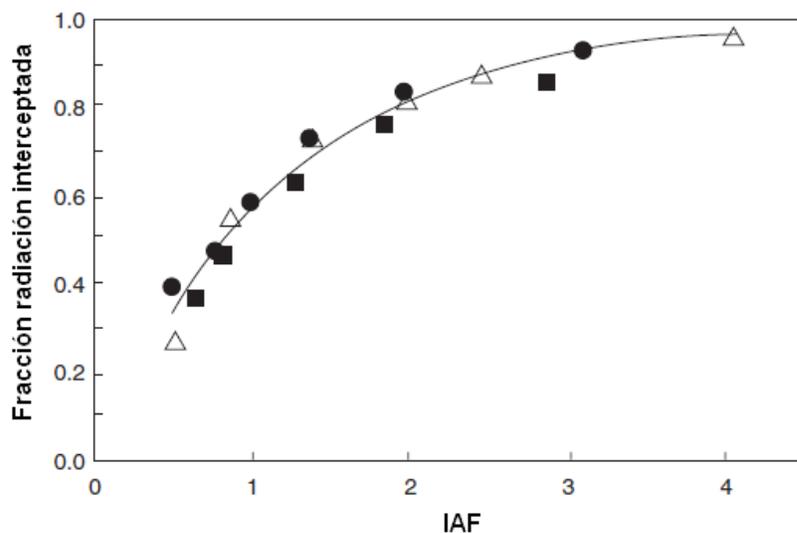
El tomate es un cultivo insensible al fotoperiodo entre 8 y 16 horas, aunque requiere buena iluminación (Calvert, 1973). Iluminaciones limitadas, al reducir la fotosíntesis neta, implican mayor competencia por los asimilados en la planta lo que incide directamente en el desarrollo y producción (Aung, 1976).

La cantidad de luz interceptada es un factor predominante en el crecimiento del cultivo de tomate y la producción de biomasa, y depende principalmente del área foliar. También se ve afectada por la combinación de longitud del día, ángulo solar, cobertura atmosférica, densidad de plantas, estructura del dosel y; para cultivos en invernadero, por la estructura del mismo y el tipo de material de cobertura (nylon, vidrio), lo que determina qué cantidad de luz ingresa al invernadero. Mientras que la distribución espectral de luz recibida en un determinado punto depende del ángulo solar, la atmósfera, la

transmisión a través de las hojas y la reflexión de las plantas y otros objetos cercanos, incluida la superficie del suelo (Heuvelink y Dorais, 2005a).

Salazar et al. (2015) con el propósito de predecir semanalmente el rendimiento de tomate en un experimento en invernáculos semi cerrados en Berlín, demostraron la radiación como variable de entrada logra un coeficiente de correlación de $R= 0,915$ con un error absoluto muy pequeño.

La relación entre la cantidad de luz interceptada y el área foliar se puede describir como una función exponencial negativa del índice de área foliar (IAF) (área de la hoja m^2 / área del suelo m^2). Con un IAF de 3 para un cultivo indeterminado intercepta teóricamente alrededor del 90% de la luz incidente como muestra la figura 9. Las plantas en un cultivo joven apenas compiten entre sí por la radiación. A esa etapa, que se caracteriza por un bajo IAF ($<1,5$ m^2 hoja / m^2 suelo), la tasa bruta de fotosíntesis del cultivo (P_{gc}) es casi proporcional al IAF. El área foliar nueva contribuye a la tasa de crecimiento en la misma medida que el área foliar existente, ya que el sombreado interno de las hojas es muy limitado. En un dosel cerrado, sin embargo, la extensión del área foliar es de menor importancia en comparación con un cultivo joven, porque la mayoría de la luz se intercepta a un IAF alto (> 3 m^2 hoja/ m^2 suelo) y el aumento del IAF tiene un efecto marginal en P_{gc} (Heuvelink y Dorais, 2005a).



Mediciones a (●) 26 de febrero, (△) 18 de marzo y (•) 13 de julio. La línea continua es la ecuación de regresión: $y = 1 - e^{-0.83x}$

Figura 9. Intercepción de luz de plantas jóvenes de tomate dispuestas a diferentes densidades de plantas con el fin de variar el índice de área foliar (IAF). Fuente: tomado de Heuvelink y Dorais (2005a).

La interceptación de luz también depende de la estructura del dosel, la distribución del área de la hoja sobre el área de la tierra y las prácticas culturales. Por ejemplo, bajo condiciones de luz difusa, el efecto del ancho del camino del invernadero en la fotosíntesis del cultivo se vuelve importante cuando la altura de la fila es menor que la distancia de la fila. En el cultivo holandés, asumiendo IAF en 3, y con una altura de hilera de 2.25 m y un ancho de hilera de 1.25 m a una distancia de hilera de 1.6 m, Gijzen (1995) calculó que la asimilación diaria de CO₂ era en promedio un 5% menor que para un dosel cerrado en el mismo IAF. Se hicieron intentos para "cerrar" los caminos cuando no se necesitaban para la cosecha o la gestión del cultivo, mediante el uso de cables móviles que sostienen las plantas y se unen a la parte superior de la estructura del invernáculo. El aumento esperado en la producción no fue observado, probablemente porque fue contrarrestado por una influencia negativa de frecuentes movimientos en el crecimiento de la planta de tomate. Con una idéntica densidad de plantas e IAF, una cosecha cultivada en cuatro hileras interceptará más luz en sus etapas iniciales que una cosecha cultivada en dos hilera. Más tarde en el cultivo, ambos cultivos se verán igual desde arriba y la interceptación apenas diferirá (Heuvelink y Dorais, 2005a).

La cantidad y calidad de luz interceptada por un cultivo puede ser significativamente mejorada o modificada por la presencia de material reflectante en el suelo, como láminas de plástico blanco y paja seca. El suelo desnudo refleja el 10-20% de la radiación fotosintética activa (PAR, 400-700 nm), mientras que las láminas de plástico blanco sobre la superficie del suelo, una práctica común en invernaderos modernos, pueden reflejar 50-80% de la luz PAR y aumentar la Pgc durante toda la temporada por al menos 7% para un IAF de 3. Esto es especialmente importante para un cultivo joven, donde mucha luz es transmitida por el cultivo y llega al suelo (Gijzen, 1995).

El empleo de doble capa permanente de plástico en el invernadero (cielorraso), para mejorar las condiciones térmicas durante el invierno, también genera reducciones de la radiación interior con incidencia negativa en la producción. También es común en la práctica blanquear el invernadero, a fin de reducir las altas temperaturas en primavera-verano, reduce la radiación; sería deseable dotar a los invernaderos de una ventilación más eficiente (aberturas cenitales) y evitar esa práctica de blanquear, que reduce radiación, y por lo tanto, la producción (Van de Vooren et al., 1986).

Picken et al. (1986) señalan que el factor que más afecta el desarrollo vegetativo es la iluminación diaria total, mientras que la calidad de la luz y el fotoperiodo desempeñan un papel secundario. También señala que siempre es posible mejorar las condiciones de iluminación con prácticas tales como la optimización de la orientación del invernadero y de las filas de plantas dentro

del mismo, además de la limpieza de su cubierta. En los invernaderos, cuando la irradiación es elevada, la concentración de CO₂ puede disminuir rápidamente hasta concentraciones que limiten la fotosíntesis y el crecimiento, de modo que para mantener la fotosíntesis es necesario restaurar la concentración de CO₂ mediante enriquecimiento artificial o ventilación (apertura de cortinas laterales).

Heuvelink y Dorais (2005a) evaluaron la influencia del área foliar en el rendimiento del tomate, tanto por simulaciones y por trabajo experimental. Mediciones en siete granjas comerciales de tomate mostraron que en la temporada de verano la interceptación de la luz estaba en promedio un 90%, con valores que varían entre 86% y 96%. El rendimiento aumentó hasta un IAF de 4, sin apenas ningún efecto sobre el rendimiento a mayor IAF; la curva de respuesta mostró un tipo de curva de saturación en lugar de una curva de respuesta óptima. Sin embargo, se reportan valores de IAF bajos como 1.5 o 2 en verano. Esto resulta en una reducción de la fotosíntesis de los cultivos, rendimiento y calidad de la fruta. Esto podría ser evitado usando una densidad de planta más alta, pero temprano en la temporada (poca luz) ya que una mayor densidad influye negativamente en el tamaño y el rendimiento de la fruta.

Por lo tanto, en cultivos modernos en invernadero, se comienza con una densidad de plantas bastante baja (2.1-2.5 plantas/m²) y en primavera se conserva uno o dos brotes laterales de cada cuatro plantas. De esta manera, la densidad del tallo se incrementa hacia el verano y se puede mantener un IAF más alto, lo que resulta en un aumento significativo del rendimiento sin costos adicionales de siembra. Aumentando la densidad hacia el verano también da como resultado un tamaño de fruta más uniforme durante toda la temporada y una mejor calidad de fruta (Heuvelink y Dorais, 2005a). Por ende la densidad de plantación, el sistema de poda y conducción deben optimizar la interceptación de radiación por el cultivo, especialmente en la época invernal cuando la radiación es más limitante. Maximizar la radiación dentro del invernadero en esa época es un objetivo primordial, ya que la reducción de radiación implica una reducción lineal de cosecha (Castilla, 1995).

Para una óptima interceptación de luz y rendimientos de fruta de un cultivo de tomate cultivado en el campo, el IAF debe ser de alrededor de 4-5, según los cultivares, fertilidad del suelo, sistemas de cultivo, riego y radiación solar disponible. Los valores inferiores de LAI reducirían la interceptación de la luz y aumentarían las pérdidas de rendimiento debido a daños en fruta por quemado de sol, mientras que valores mayores pueden retrasar la aparición de la producción de fruta y reducir la efectividad de las aplicaciones de pesticidas foliares debido a un excesivo crecimiento vegetativo (Scholberg et al., 2000).

Bajo irradiancias totales diarias superiores a unos 2 MJ/m²/día, las alturas de las plantas con la misma materia seca son constantes. Reducir la

irradiancia diaria por debajo de este nivel generalmente aumenta la tasa de elongación del tallo. El resultado es un tallo más débil, más delgado pero más con mayor altura (Heuvelink, 2005b). Por otro lado, van de Vooren et al. (1986) habla de valores de radiación total diaria en torno a $0,85 \text{ MJ/m}^2$ como umbrales considerados mínimos para la floración y cuajado, siendo preferible mayor iluminación en menor periodo de tiempo que iluminaciones débiles durante más tiempo. Hoy en día, la mejora genética permite disponer de cultivares mejor adaptados para la floración y cuajado de fruto en condiciones de baja iluminación, usuales en ciclos de invierno.

Cockshull (1988) informó una relación lineal entre el rendimiento acumulado del tomate y la radiación solar acumulada a la altura del cultivo dentro de un invernadero. En un experimento de sombreado (6,4% y 23,4% de reducción de la radiación solar incidente en las plantas de tomate), Cockshull et al. (1992) observaron durante las primeras 14 semanas de cosecha que, el rendimiento se acumuló en proporción directa a la radiación solar donde, independientemente del tratamiento, se cosecharon 2,0 kg de peso fresco de fruta por cada 100 MJ de radiación global incidente en los cultivos desde el inicio de la cosecha. Una regla de oro para estimar los efectos de la luz en la producción, y de uso frecuente en la práctica, es la regla del uno por ciento, que establece que la reducción del 1% de la luz reducirá la producción en un 1%. A pesar de su simplicidad, la regla del uno por ciento a menudo da buenas estimaciones de las consecuencias de la pérdida de luz en el rendimiento del tomate.

La luz también puede tener un papel indirecto o directo en la regulación de las relaciones fuente-fosa involucrada en la asignación de fotoasimilados dentro de la planta en crecimiento. La intensidad de luz recibida por la planta afecta la cantidad de asimilados disponibles para los diferentes órganos y, por lo tanto, su grado de competencia como fosas (Heuvelink y Dorais, 2005a).

En condiciones de poca luz, la aparición de la primera inflorescencia se retrasa a medida que se inician más hojas antes de la misma, y se reduce el desarrollo floral y se observa aborto de flores. En la práctica, el cuajado de fruta podría mejorarse temporalmente con poca luz eliminando algunas hojas jóvenes que compiten con los órganos fosas por asimilados (Heuvelink y Dorais, 2005a). En esta misma línea, Calvert (1964) señala que el número de hojas producidas antes de la primera inflorescencia se reduce en condiciones de alta luminosidad.

La iluminación insuficiente entre otros factores, un exceso de fertilización o un cuajado previo abundante, incluso después de la polinización pueden provocar caída de flores. La poca luz puede reducir el tamaño de las flores y los ovarios y el óvulo el desarrollo puede cesar bajo tales condiciones

antes o poco después de la formación del saco embrionario (Heuvelink, 2005b). Chamorro (1995) señala que el enriquecimiento con CO₂ en condiciones de baja irradiación y temperatura elevada que se produce en los invernaderos, acelera el crecimiento de las flores en la primera inflorescencia y reduce el aborto de las flores.

Tanto el tamaño como el contenido en sólidos solubles del fruto dependen de los fotoasimilados recibidos de las hojas. En las zonas en que la iluminación es baja al principio de la época de cultivo, la proporción de frutos huecos es elevada (80-90%) y la materia seca del fruto en las primeras recolecciones baja (5% o menos, Chamorro 1995).

La iluminación es un factor importante en el desarrollo del color de los tomates y afecta particularmente la síntesis de licopeno (Chamorro, 1995).

2.4.1.3 Humedad relativa

La humedad en un invernadero es el resultado del equilibrio entre la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, la condensación en la cubierta del invernadero y la pérdida de vapor durante la ventilación (Hand, 1988). Existen limitaciones en la efectividad del control de la humedad, por ejemplo, como las cortinas se abren y cierran para controlar la temperatura, la humedad y los niveles de CO₂ también cambian. La ventilación para el control de la humedad es más efectiva cuando el aire exterior es significativamente más fresco y seco que el que se encuentra dentro del invernadero. A medida que el aire frío y seco se calienta en el invernadero, absorbe la humedad y la misma disminuye. La reducción de la humedad mediante la entrada de aire exterior puede ser algo efectiva incluso si el aire exterior es muy húmedo, siempre que sea significativamente más frío que el aire interior. En términos prácticos, sin embargo, el aire exterior debería ser significativamente más frío y seco para justificar el costo de la ventilación (Peet y Welles, 2005b).

Como los efectos en el microclima del invernadero son complejos, determinar si la humedad como factor específico afecta el rendimiento es particularmente difícil, ya que el rendimiento puede verse afectado por interacciones sutiles en el nivel o la distribución espacial y temporal de factores principales como la irradiancia o la temperatura (Grange y Hand, 1987).

La cantidad de vapor de agua que puede contener un determinado volumen de aire depende de la temperatura, casi el doble por cada 10 ° C de aumento de temperatura. La tasa de transpiración aumenta a medida que aumenta la diferencia entre la atmósfera totalmente saturada dentro de la hoja (100% HR) y el contenido de vapor de agua fuera de la hoja. Matemáticamente,

esta diferencia se describe como el déficit de vapor, o déficit de presión de vapor (DPV), y se mide mediante comparaciones de termómetros de bulbo húmedo y seco. Como el vapor de agua ejerce presión, se expresa en unidades de presión: milibares (mbar) o kilopascales (kPa). La humedad relativa (relación entre la masa de vapor de agua en el aire y la masa que puede contener en el punto de saturación) a veces se discute en términos del correspondiente déficit de presión de vapor (DPV). El DPV no puede controlarse completamente en invernaderos, pero el aumento de la temperatura, la ventilación y el movimiento del aire generalmente lo aumentarán, mientras que el aumento del agua de riego, la nebulización y el empañamiento generalmente disminuirán el DPV (Peet, 2005a).

Bakker (1990) señala que el rendimiento temprano en tomate fue mayor a una humedad alta (bajo DPV) durante el día, pero el rendimiento final se redujo por la misma condición durante el día o la noche. El peso medio del fruto y la calidad de conservación se redujeron bajo condiciones de alta humedad. El rendimiento final y el peso medio del fruto se relacionaron significativamente con el DPV media de 24 h. Se concluye que las pérdidas de rendimiento en condiciones de alta humedad se deben a las reducciones en el peso medio de la fruta por un efecto combinado entre reducción en el área foliar y racimos retorcidos, que restringe el flujo de savia del floema en los frutos y contrarrestan el efecto positivo de un aumento en la conductancia estomática. Sin embargo, este estudio se realizó en un rango bastante limitado de DPV: 0,35-1,0 kPa en el día y 0,2-0,7 kPa en la noche.

No está claro en qué medida la baja humedad (DPV alto) es perjudicial para la planta si hay agua disponible, pero en general, valores de DPVs > 1.0 se consideran potencialmente estresantes. Una temperatura de invernadero de 26 ° C y una humedad relativa del 60% daría como resultado un VPD de 1,35, para ejemplo (Peet y Welles, 2005b).

Por otro lado otros autores señalan que condiciones de humedad alta puede aumentar la relación de área foliar (área foliar por peso seco de la planta; cm^2/g), aunque la tasa de asimilación neta se reduce (Grange y Hand, 1987). En estudios a corto plazo, la humedad tuvo poco efecto sobre ambos parámetros en tomates cultivados bajo condiciones de poca luz (Hurd, 1973), mientras que el área foliar aumentó cuando la humedad aumentó de 1.0 a 0.2 kPa (Suto y Ando, 1975). La neblina también podría aumentar el área de la hoja en condiciones de mucha luz. Pero en condiciones extremas de alta irradiancia y alta humedad, la reducción en la transpiración puede causar un aumento en la temperatura de la hoja y un daño consecuente (Grange y Hand, 1987).

Como se puede observar, los efectos de la alta humedad en el crecimiento son bastante variables. El peso ha aumentado en algunos

experimentos en una especie dada, pero no en otros, y la misma especie podría mostrar respuestas opuestas en diferentes experimentos. Con esto se sugiere que se esperarían efectos sobre el crecimiento de la planta y el cultivo, al menos en los valores extremos de humedad (Grange y Hand, 1987).

Finalmente dentro del control ambiental, el control de la humedad en tomate debería por lo tanto recibir una alta prioridad y concentrarse en evitar alta humedad a largo plazo y así optimizar la producción y calidad de la fruta (Bakker, 1990).

Poco se sabe sobre la respuesta de las tasas de fotosíntesis del tomate a diferentes humedades, sin embargo, en muchas otras especies, la humedad tiene poco efecto en el rango de 0.5-2.0 kPa o aumenta la fotosíntesis al aumentar la humedad. La tasa de fotosíntesis se ve aumentada humedad alta, donde se observa con frecuencia que también se incrementa la conductividad estomática. Esto es indicativo de la disminución del estrés hídrico en la hoja; las bajas humedades provocan pérdidas excesivas de agua, cierre de estomas y posterior restricción del intercambio de dióxido de carbono (Grange y Hand 1987, Heuvelink y Dorais 2005a). Este último es el efecto más obvio de humedades muy bajas, inducir el estrés hídrico de las hojas cuando la absorción de agua a través del sistema de raíces es inadecuada para hacer frente a las altas tasas de transpiración (Grange y Hand, 1987).

Para DPVs (Déficit de presión de vapor) que varían de 0.2 a 0.8 kPa, Gijzen (1995) reportó bajos rendimientos, tamaño de fruta reducido y vida útil de fruta corta bajo condiciones de alta humedad (DPV bajo). Si estas condiciones de alta humedad son sostenidas, crecimiento reducido o muerte del ápice, daño de la hoja y fasciación del tallo del tomate también se pudo observar. También hay una reducción en la tasa de fertilización del óvulo, debido a la liberación más difícil del polen. Por el contrario, la ingesta de calcio en la fruta de tomate es mayor bajo condiciones de menor DPV o cuando las noches son húmedas en lugar de secas.

La razón más importante para reducir la humedad y mantener secas las superficies de las hojas es la prevención de enfermedades, como ser Moho gris (*Botrytis cinerea*) y Moho foliar (*Cladosporium fulvum*). Las enfermedades se diseminan rápidamente cuando el DPV es de 0.2 kPa o menos, y la germinación de las esporas del hongo patógeno aumenta en las superficies húmedas de las hojas. Esto es más probable cuando los días cálidos y soleados aumentan la transpiración y la evaporación de las hojas, pero la humedad se mantiene como vapor de agua hasta que el aire se enfría al punto de rocío durante la noche. El vapor de agua luego se condensa en superficies frías, como las hojas y la capa interna del invernadero, y gotea desde la piel del invernadero hacia las hojas. El problema del goteo sobre las hojas por el

condensado es más severo en los invernaderos de doble polietileno, porque el arco redondeado hace que sea difícil recolectar y eliminar el drenaje. Los invernaderos de vidrio y paneles acrílicos son menos húmedos desde el principio y el techo es más empinado, por lo que la humedad se escurre en lugar de acumularse. El aumento del movimiento de aire a 1 m/s (las hojas se mueven ligeramente) en el invernadero reduce la condensación en las hojas al reducir las diferencias de temperatura entre la superficie de la hoja y el aire, evitando que las superficies de las hojas se enfríen por debajo del punto de rocío (Peet y Welles, 2005b).

Otro efecto de la humedad cuando es alta es que el polen tiende a permanecer dentro de las anteras, mientras que a bajas humedades puede no adherirse al estigma. En el rango entre 50% y 90%, los efectos de la humedad relativa son pequeños (Heuvelink, 2005b).

2.5 ENFOQUE METODOLÓGICO

Según Affholder et al. (2012), la cuestión de identificar y establecer la jerarquía de las causas principales de las brechas entre los rendimientos de cultivos "potenciales" o "alcanzables" y los rendimientos efectivamente obtenidos por los agricultores en un área determinada, es una de los mayores desafíos de la agronomía. Han sido abordado durante décadas bajo el nombre de "Diagnóstico Agronómico Regional (DAR, Doré et al., 1997, 2008)" o "análisis de brecha de rendimiento" (Doré et al. 2008, Lobell et al. 2009, van Ittersum et al. 2013). Equivale a identificar y establecer la jerarquía de los factores de producción responsables de las variaciones de rendimiento en un área determinada. Para ello se propone identificar y jerarquizar las muchas causas posibles causas, de mayor influencia, que generan variaciones en el rendimiento utilizando métodos multivariantes (Lobell et al. 2009, Affholder et al. 2012).

2.5.1 Diagnóstico agronómico regional y trabajo en predios de productores

El desarrollo de sistemas de cultivo sostenibles es una prioridad clave para los agrónomos y los científicos de cultivos. Un primer paso implica comprender la relación entre el rendimiento del sistema de cultivo y las prácticas de los agricultores. Para completar este paso, se ha desarrollado un marco metodológico titulado DAR. Varios aspectos de DAR han mejorado en los últimos diez años. En el pasado, el diagnóstico generalmente se aplicaba a una sola variable: el rendimiento del cultivo, y el diagnóstico de problemas

agronómicos en los sistemas de cultivo a menudo se limitaba a encuestas entre agricultores, en las cuales se les pregunta sobre los problemas que enfrentan (Doré et al., 1997). Además es un método alternativo a los que se utilizan hoy para determinar las prioridades en la investigación, como ser las opiniones de expertos o las propias opiniones de los productores, en lo referente a identificar las fuentes de variación en el rendimiento de los cultivos (Doré et al., 1997).

DAR implica el análisis funcional basado en (1) un análisis de las relaciones entre la variabilidad del rendimiento y las características del cultivo y/o el medio ambiente durante el período de crecimiento, y (2) un análisis de las relaciones entre las características del sistema suelo-planta y las prácticas de los agricultores (Doré et al., 1997).

En varios estudios recientes, este método se ha aplicado a otras variables relacionadas con la calidad del cultivo y el impacto ambiental, con consecuencias metodológicas. También se han propuesto y utilizado nuevos métodos para analizar las relaciones causales entre los sistemas de cultivo de los agricultores y su desempeño agronómico o ambiental. Además se han mejorado las metodologías, en particular mediante la selección de indicadores para evaluar los efectos del manejo de los cultivos, las condiciones del suelo y el clima y el análisis de los datos. Finalmente, el diagnóstico agronómico regional se ha integrado a enfoques más generales del desarrollo agrícola (Doré et al., 2008).

La comprensión de los efectos de los sistemas de cultivo sobre las características del suelo, el crecimiento y desarrollo de las plantas es esencial para la mejora de las prácticas agrícolas. La mejora puede aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos y reducir el impacto ambiental de los sistemas de cultivo, contribuyendo de este modo, en diversos grados, al desarrollo sostenible (Doré et al., 2008).

Los estudios se pueden realizar en estaciones experimentales donde mediante ensayos se fijan y combinan diferentes factores, para evaluar los efectos de diferentes tratamientos sobre el rendimiento del cultivo, la calidad o el valor ambiental. Sin embargo, existen otros estudios realizados en los predios que intentan identificar y clasificar las prácticas de cultivo responsables, en interacción con el medio ambiente, para una gran proporción de la variabilidad total en la producción de cultivos, la calidad de los cultivos y el impacto ambiental en una región. Dichos estudios no se basan en ensayos experimentales. En cambio, se basan en el monitoreo y la serie de mediciones en una red de campos cultivados por agricultores que utilizan las prácticas de cultivo actuales. Estos estudios en fincas se usan con fines de diagnóstico, y sus resultados se utilizan para definir sistemas de cultivo innovadores (Doré et al., 2008). Como señalaron Lobell et al. (2005) para el rendimiento de los

cultivos, *"la identificación de estrategias para reducir la brecha de rendimiento requiere una comprensión de sus causas"*, de ahí la necesidad de un diagnóstico.

El DAR tiene como objetivo determinar por qué algunos campos en una región agrícola no alcanzan el nivel de rendimiento esperado. Este enfoque implica determinar y dar cuenta de la variabilidad en la producción (o brechas de producción) o daño ambiental dentro de un conjunto de predios de agricultores (Doré et al., 2008).

Para ello el método propuesto está diseñado para identificar las características del ambiente del cultivo y el manejo del cultivo (y sus interacciones) que son responsables de estas diferencias. Si el objetivo especificado anteriormente tiene algún significado en el contexto de la mejora del sistema de cultivo, las variaciones en el rendimiento en la muestra de campos en los que se basa el diagnóstico no se deben únicamente a las diferencias en el entorno. Pocos cambios en los sistemas de cultivo serán relevantes si las diferencias debidas al manejo de los cultivos son insignificantes en comparación con las causadas por grandes diferencias ambientales. Debido a esto se propone un área de la muestra no demasiado extensa, ya que las variaciones en el clima y el suelo aumentan más allá de algunos 100 km², y el método propuesto ya no es efectivo a tal escala (Doré et al., 1997).

Lobell (2012) realizó estudios sobre el uso de la teledetección para medir la magnitud y las causas de las brechas de rendimiento para así, hacer frente a la heterogeneidad. Ha demostrado repetidamente que los datos satelitales brindan información que, por sí mismos o en combinación con otros datos y modelos, puede medir con precisión los rendimientos de los cultivos en los campos de los agricultores. Los mapas de rendimiento resultantes brindan una oportunidad única para superar los desafíos de escalado espacial y temporal y así mejorar la comprensión de las brechas de rendimiento de los cultivos.

La identificación por parte del DAR del elemento o combinación de elementos potencialmente responsables del rango de variación en el rendimiento del cultivo observado a escala regional requiere el desenmarañamiento de relaciones complejas, y esto debe abordarse en la situación real de los campos de los agricultores. De hecho, sería difícil reproducir toda la gama de combinaciones de entornos físicos y prácticas agrícolas existentes dentro de una región en ensayos experimentales (Doré et al., 2008).

Por lo tanto, realizar un diagnóstico de las variaciones del rendimiento de los cultivos implica analizar la acumulación del rendimiento de los cultivos en una red de predios para describir la relación entre el manejo del cultivo, el ambiente y el rendimiento para cada pedio. Esta revisión es una jerarquía de las características del manejo del cultivo y el medio ambiente responsable de las variaciones observadas en el rendimiento. El diagnóstico sigue el marco general resumido en la figura 10 y se repite durante varias temporadas en la misma área para explorar las variaciones año a año asociadas al clima (Doré et al., 1997). Las observaciones y los resultados obtenidos durante un año pueden revelar imperfecciones en la selección de algún pedio o falta de conocimiento para comprender los componentes del rendimiento, por tanto pueden realizarse mejoras de un año para otro (Doré et al., 1997).

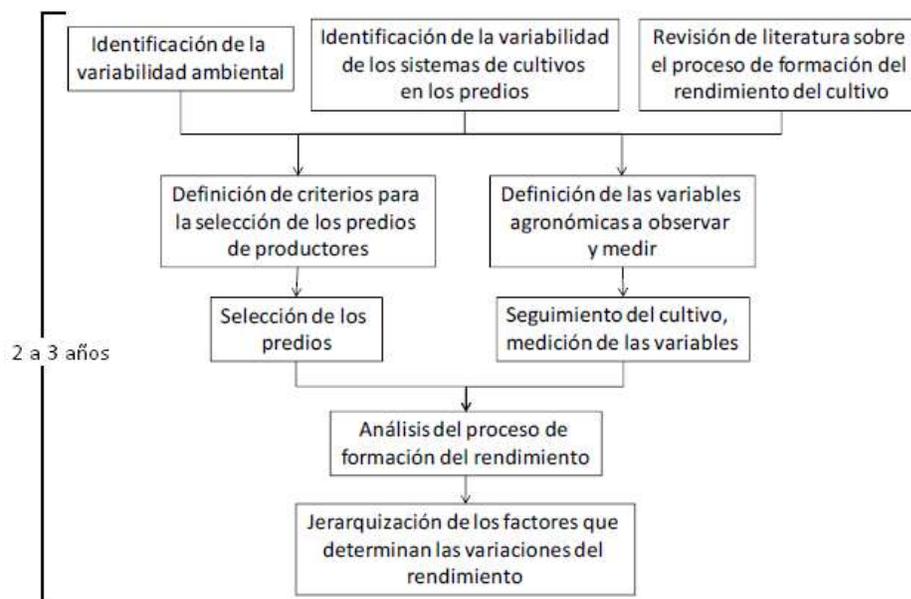


Figura 10. Diagrama explicativo del método de diagnóstico agronómico regional (DAR).

Fuente: adaptado de Scarlato (2015).

Las hipótesis sobre las principales fuentes de variaciones en el rendimiento del cultivo generalmente pueden hacerse a priori de la investigación (Doré et al., 1997). La elección de la muestra de los predios se basa en tres criterios: i) variaciones del medio ambiente; ii) variaciones en el manejo del cultivo; y iii) datos publicados sobre la susceptibilidad del cultivo a diferentes manejos y ambientes (Doré et al., 1997).

El método de diagnóstico propuesto se basa en una representación del sistema de cultivo donde se definen variables ambientales, técnicas de cultivo, y el crecimiento y desarrollo del mismo que definen el rendimiento; con gran relación entre ellas. Esta representación optimiza el uso del conocimiento agronómico como muestra la figura 11, donde el rendimiento acumulado difiere según las condiciones ambientales y los cambios que ocurren sobre ellas según las técnicas de cultivos utilizadas. Esto muestra las relaciones causales existentes entre las técnicas de cultivo y la acumulación de rendimiento, en las que se basa el diagnóstico en sí (Doré et al., 1997).

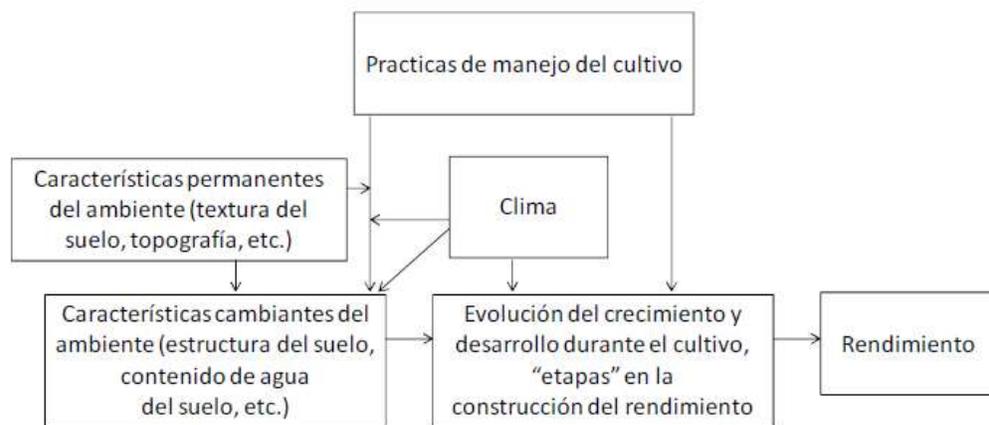


Figura 11. Diagrama explicativo de variables y relaciones del sistema de cultivo según la metodología DAR.

Fuente: Scarlato (2015).

Al aprender este enfoque, los agrónomos se familiarizan con una aproximación a los sistemas complejos típicos de la agricultura real, cuyo estudio no siempre se puede reducir a las comparaciones de "todos los demás factores son iguales" de experimentación factorial. Además, el diagnóstico se basa en un método inductivo de razonamiento, en el cual el objetivo es volver a las causas de los resultados observados. Esto es al menos una parte del deber de los agrónomos involucrados en innovación y desarrollo (I + D), más allá del razonamiento hipotético y deductivo más habitual (Doré et al., 1997).

Según Milleville (1993), actualmente resulta más interesante la investigación en un medio llamado "real", es decir, entre agricultores. Este tipo de investigaciones permiten a los agrónomos ampliar considerablemente sus escalas de referencias, identificar y jerarquizar las imposiciones que realmente se ejercen en la elaboración de la producción y en la evolución de los entornos, comprender las técnicas alternativas a través del funcionamiento de la

explotación agrícola en su conjunto. Milleville (1993) también señala que las prácticas agrícolas son de naturaleza sistémica y no se reducen a reglas o principios de acción, sino que preceden de una elección del productor según sus objetivos y percepción de su entorno y de su propia situación.

Estudios realizados por Dogliotti et al. (2014) muestran que a pesar de la gran variabilidad entre granjas en dotación de recursos, estructura del sistema de producción, etapa en el ciclo de vida de la granja y posibilidades de sucesión agrícola, se enfrentan a problemas similares los cuales comparten con muchas familias agricultoras en todo el mundo siendo las mismas: bajo ingreso familiar, carga de trabajo excesiva y calidad de suelo deteriorada.

2.5.2 Estudio de brecha de rendimiento

Los rendimientos promedio en los sistemas de secano son comúnmente del 50% o menos del potencial de rendimiento, lo que sugiere un amplio margen de mejora. En términos generales se observa una amplia gama de brechas de rendimiento en todo el mundo para casi todos los cultivos, con rendimientos promedio que van desde aproximadamente el 20% al 80% de potencial de rendimiento (Lobell et al., 2009).

En este contexto, la revolución verde en la segunda mitad del siglo XX rescata el concepto de que los altos rendimientos no son suficientes para la protección ambiental, pero seguirán siendo un componente crítico y necesario de una estrategia global para lograr la seguridad alimentaria y al mismo tiempo protegerán los recursos naturales y la calidad ambiental para las generaciones futuras (Lobell et al., 2009).

Las brechas de rendimiento (Y_g) se estiman por la diferencia entre el rendimiento potencial (Y_p) y el rendimiento real (Y_a) obtenido por los agricultores en una escala de interés espacial y temporal específica. Por definición, el potencial de rendimiento es un estado idealizado en el que un cultivo crece sin limitaciones biofísicas distintas de factores incontrolables, como la radiación solar, la temperatura del aire y la lluvia en los sistemas de secano. Por lo tanto, para alcanzar el potencial de rendimiento se requiere la perfección en el manejo de todos los demás factores de producción determinantes del rendimiento (como la población de plantas, el suministro y balance de nutrientes esenciales y la protección contra pérdidas por insectos, malezas y enfermedades) desde la siembra hasta la madurez. Tal perfección es imposible en condiciones de campo, incluso en parcelas de prueba relativamente pequeñas, y mucho menos en grandes campos de producción. Por lo tanto, el potencial de rendimiento a veces se estima mediante modelos de cultivo validados a nivel de campo, que asumen un manejo perfecto y

carecen de todos los factores de reducción del rendimiento (Lobell et al. 2009, van Ittersum et al. 2013).

Los mejores rendimientos de los agricultores de una región determinada pueden dar una idea mejor de lo que realmente se puede lograr bajo las condiciones edáficas normales de esa región (Lobell et al., 2009). Sin embargo, puede suceder que se obtienen altos rendimientos en algunos suelos localizados características de retención de agua más favorables, mientras que la mayoría los agricultores de la región se enfrentan a suelos más adversos, con pocas posibilidades de alcanzar rendimientos similares. También es probable que el uso de los rendimientos máximos de los agricultores como indicador del rendimiento potencial sea más apropiado en sistemas de cultivo administrados intensivamente, con altos niveles de fertilizantes y plaguicidas, donde los factores limitantes del rendimiento tales como deficiencias de nutrientes, ataques de insectos, enfermedades y competencia con malezas son prácticamente eliminados. Sin embargo, aún entonces es improbable que un agricultor alcance el potencial de rendimiento limitado en agua, ya que el manejo óptimo de nutrientes y plagas es bastante difícil de lograr y en muchos casos económicamente no beneficioso (Affholder et al., 2013).

Otro concepto es el de rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) siendo similar a Y_p , pero el crecimiento del cultivo está limitado también por suministro de agua, y por lo tanto influenciado por el tipo de suelo (capacidad de retención de agua y la profundidad de enraizamiento) y la topografía del terreno (escorrentía, van Ittersum et al., 2013).

El rendimiento promedio (Y_a) se define como el rendimiento realmente logrado en pedios de agricultores bajo las prácticas de manejo más ampliamente utilizadas, donde el número de años utilizados para estimarlo debe ser un compromiso entre la variabilidad en los rendimientos y la necesidad tendencias de rendimiento temporal debido al cambio tecnológico o climático (van Ittersum et al., 2013). En base a lo mencionado, Lobell et al. (2009) cuestiona cuáles son las causas de las diferencias entre los rendimientos promedio y el potencial, y cuáles son las perspectivas de reducir esta brecha de rendimiento.

Otro concepto importante es el de “brecha de rendimiento explotable” representada en la figura 12, la cual ajusta el concepto de potencial a un nivel alcanzable de producción por los agricultores, equivalente al 75-85% del rendimiento potencial (Y_p) o del rendimiento limitado por agua (en cultivos en seco, van Ittersum et al., 2013).

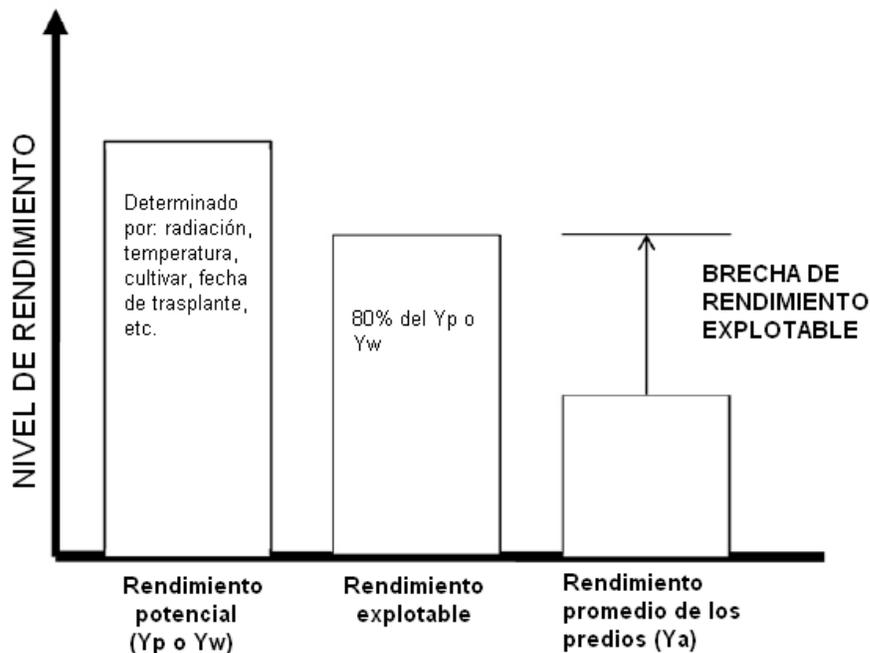


Figura 12. Representación de la brecha de rendimiento explotable. Fuente: adaptado con base en van Ittersum et al. (2013).

Según Scarlato (2015), si bien la metodología de diagnóstico agronómico regional (Doré et al., 1997, 2008) y el estudio de brechas de rendimientos es una línea de trabajo que en los últimos años ha tomado relevancia a nivel internacional publicándose varios trabajos importantes (David et al. 2005, Joel Huat 2006, Lobell et al. 2009, Delmotte et al. 2011, Affholder et al. 2013, Tiftonell y Giller 2013, van Ittersum et al. 2013), mientras que a nivel nacional, y más aún en cultivos hortícolas, existen muy pocos antecedentes. Se han desarrollado trabajos en dicha línea para: tomate para industria en Uruguay (Berrueta et al., 2012), frutilla en la zona de Salto (Bordenave et al. 2012, Bordenave 2013), tomate bajo invernáculo en la zona sur de Uruguay (Lammers, 2015), frutilla en la zona sur de Uruguay (Scarlato, 2015, 2017) y en el cultivo de trigo (Ernst et al., 2015).

Por otro lado, esta metodología ha sido utilizada fundamentalmente para analizar rendimientos y es aún escaso su uso para otros objetivos, como ser el análisis de la calidad de cosecha (Doré et al., 2008).

de Ponti et al. (2012) analizaron las brechas de rendimiento de cultivos orgánicos y convencionales demostrando que, los rendimientos orgánicos de los cultivos individuales son en promedio el 80% de los rendimientos convencionales, pero la variación es sustancial (desviación estándar del 21%).

El fundamento a esta hipótesis es que cuando los rendimientos convencionales son altos y relativamente cercanos al potencial, el estrés nutricional debe ser bajo y las plagas y enfermedades bien controladas. Lo cual son condiciones más difíciles de alcanzar en la agricultura orgánica.

Dore et al. (1997), Delmotte et al. (2011), Affholder (2013), han utilizado para estudios de variabilidad de rendimientos métodos estadísticos clásicos como regresiones, correlaciones y árboles de clasificación y regresión. Estos últimos se utilizaron para identificar los principales factores que controlaban la variabilidad del rendimiento y categorizar las observaciones en grupos relativamente homogéneos (Tifton et al., 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ENFOQUE GENERAL

Para estudiar las variaciones de rendimientos y comprender la relación entre los resultados productivos y las variables que afectan el rendimiento en situaciones reales junto a los productores se adaptó la metodología de Diagnóstico Agronómico Regional (Doré et al. 1997, 2008, Berrueta et al. 2012, Bordenave 2013, Scarlato 2015, Scarlato et al. 2017) y el análisis de brechas de rendimiento (David et al. 2005, Joel Huat 2006, Lobell et al. 2009, Delmotte et al. 2011, Berrueta et al. 2012, Affholder et al. 2013, Tiftonell y Giller 2013, van Ittersum et al. 2013, Ernst et al. 2015) como fue mencionado en la revisión bibliográfica.

En primer lugar, se realizó un relevamiento bibliográfico de la información disponible acerca del cultivo de tomate enfatizando en que variables son las que influyen en el proceso de formación del rendimiento y la respuesta del cultivo a diferentes condiciones de manejo y de ambiente. Luego se procedió a definir la muestra de productores y cuáles serían los métodos y materiales a utilizar con el fin de medir y/o recabar la información necesaria. Con la información recabada se construye una base de datos con el fin de realizar los análisis estadísticos y presentar los principales resultados.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE LA MUESTRA

El trabajo de campo se desarrolló entre marzo y diciembre de los años 2016 y 2017 (dos zafas de cultivo), en la zona Norte del Uruguay, en el cinturón hortícola de la ciudad de Salto como muestra la figura 13. Según el Censo general agropecuario (MGAP. DIEA, 2011) el número de productores con cultivo protegido de tomate es de 163 productores. De acuerdo a los ajustes de la metodología empleada la muestra no debería ser menor al 10% de la población objeto de estudio. De este modo el número mínimo que se debería seleccionar sería de 16 productores, pero debido a que es un valor demasiado bajo se decidió aumentar el tamaño de la muestra 26 y 24, en las zafas 2016 y 2017 respectivamente, con el fin de mejorar la base de datos para el análisis estadístico de las variables estudiadas. Dado que en algunos predios se evaluaron dos cultivos (12 y 16 predios, en 2016 y 2017 respectivamente), fueron seleccionados 79 cultivos de tomate en total (38 en la zafra 2016 y 41 en la zafra 2017).

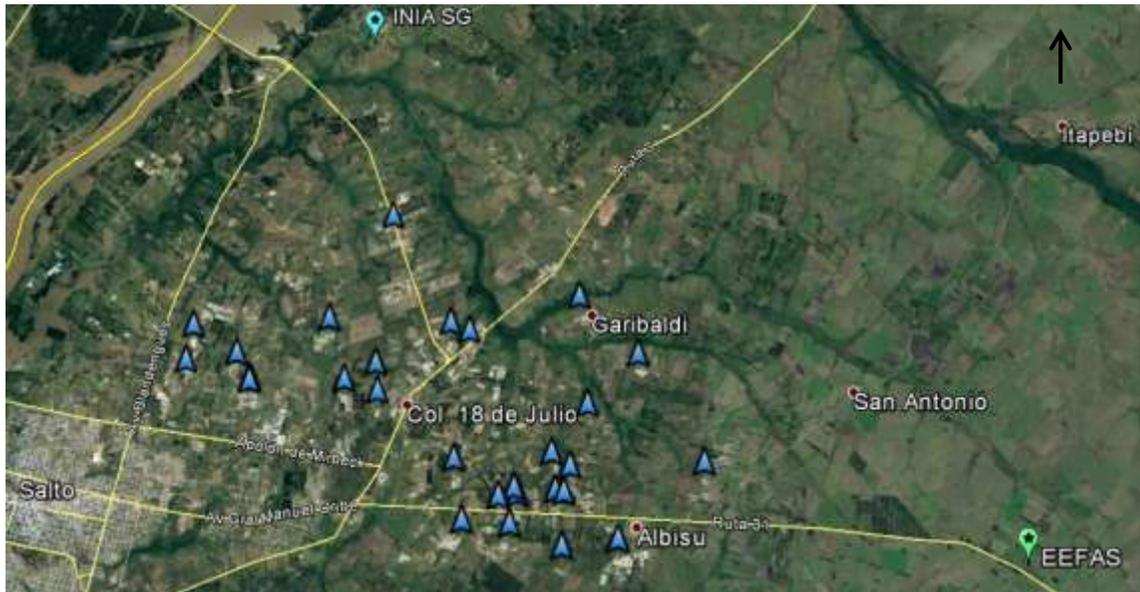


Figura 13. Mapa de ubicación de los predios seleccionados en ambas zafras.

Para la selección de los predios en forma representativa respecto a variables de escala de producción se utilizó la base de datos del Censo 2011. Mediante análisis de clusters, se dividieron los predios en 5 categorías utilizando como variables clasificatorias el área de invernáculos, el área de cultivo de tomate y el área hortícola total como se muestra en el cuadro 2. La selección fue proporcional a la concentración de cada categoría dentro de cada sección policial.

La categoría 1 presenta en promedio 0,6 ha de invernáculo y 0,34 ha de tomate, la categoría 2 presenta 7,6 ha y 6 ha respectivamente, la categoría 3 presenta 2,3 ha y 1,7 ha respectivamente, la categoría 4 presenta 0,4 ha y 0,3 ha respectivamente y la categoría 5 presenta 1,8 ha y 0,5 ha respectivamente. Además se tuvo en cuenta en la selección de los productores aspectos operativos y funcionales al tipo de evaluaciones a realizar.

Cuadro 2. Estratificación de los predios en estudio según el área de invernáculos y el área de tomate.

Categorías	Características	% de productores/ categoría*	%productores seleccionados**
1	Productores pequeños, con baja área hortícola, baja área de invernáculos y baja área de tomate	56	30
2	Productores de gran área de invernáculo y gran área de tomate	5	8
3	Productores medianos en área de invernáculo y en área de tomate.	28	44
4	Productores con gran área hortícola, baja superficie protegida y baja área de tomate.	5	0
5	Productores con gran área hortícola, media a alta superficie protegida y baja área de tomate	6	6

(*) Corresponden al % que representa cada categoría sobre el total de productores según el CGA (2011) en Salto. (**) Refiere al %de predios seleccionado en las dos zafras sobre el total (2016 y 2017)

3.3 VARIABLES EVALUADAS

3.3.1 Variables agroclimáticas

Los datos climáticos que fueron evaluados incluyen temperatura (°C), humedad relativa (%) y radiación promedio diaria ($Mj/m^2/día$).

Temperatura y humedad relativa fueron registrados por sensores tipo SK-IB-R- EDS (connectivity kit embedded data systems) que fueron colocados dentro de los invernáculos a tres metros de altura aproximadamente. Se tomó como referencia de entrada al invernáculo la cara próxima al ingreso del predio, y se ubicaba el sensor aproximadamente a la mitad del mismo.

Los datos de radiación promedio diaria se obtuvieron de la estación agrometeorológica de INIA Salto Grande y Estación Experimental de la Facultad de Agronomía Salto (EEFAS). Con estos datos se obtuvo la radiación

acumulada (Mj/m^2) para cada sitio desde el momento del trasplante hasta fin de cosecha.

3.3.2 Manejo del cultivo asociado a factores determinantes del rendimiento

Se evaluaron los cultivos desde el momento de trasplante hasta el fin de la cosecha para las dos zafras 2016 y 2017 mediante visitas semanales a los predios, entrevistas y mediciones directas. En este trabajo se enfatizó en los factores determinantes que afectan el rendimiento del cultivo de tomate. Las mismas se refirieron al ambiente y a características del cultivo.

En este sentido, se registró la fecha de trasplante, fecha a la primera y última cosecha, con la finalidad de conocer el largo del ciclo, los días a inicio de cosecha y el periodo de cosecha en días. También se registró la variedad que en todos los casos corresponde a Elpida (tomate híbrido redondo indeterminado con buena adaptación a los ciclos de otoño-invierno), densidad inicial (tallos/ m^2) en etapas iniciales del cultivo, el % de muerte de plantas, densidad final (tallo/ m^2) y el marco de plantación (distancia entre filas y distancias entre plantas). Durante todo el ciclo se realizó un monitoreo de las plantas muertas en el cantero evaluado, pero no se determinaron con precisión las causas.

3.3.3 Variables relacionadas al crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo

A continuación se listan las variables de respuesta que se evaluaron correspondiente al crecimiento y desarrollo vegetativo y reproductivo, a los componentes de rendimiento del cultivo de tomate y al rendimiento por unidad de superficie y calidad del producto:

- ✓ Número de racimos por planta.
- ✓ Número de flores por racimo y por planta.
- ✓ % de cuajado: número de frutos cuajados/racimo.
- ✓ Número de frutos por racimo.
- ✓ Número de frutos por planta y por m^2 .
- ✓ Número total de frutos cosechados.
- ✓ % de pérdidas entre frutos cuajados y finalmente cosechados.
- ✓ Fracción de radiación PAR interceptada por el cultivo
- ✓ Rendimiento (Kg/m^2) y kg totales cosechados.
- ✓ Calidad del producto:
 - Tamaño promedio ponderado por categoría (mm)
 - % número de frutos y % peso por categoría con respecto al total.
 - Tamaño promedio por categoría (g).

Los componentes del rendimiento como ser número de flores por racimo y número de frutos por racimo con el fin de conocer el % de cuajado se midieron directamente en las plantas mediante dos metodologías. Al comienzo del ciclo de cultivo se seleccionaban 8 plantas sorteando el número de centro a lo largo y ancho del invernáculo por donde se ingresaba y se elegían al azar dos plantas. Las mismas se marcaban y se las evaluaba cada dos semanas aproximadamente. Luego, más hacia el final del ciclo cuando la cantidad de hojas en las plantas y la forma de conducción (bajada de planta o volcado por encima del alambre) dificultaban las mediciones, se retiraban las plantas y se terminaba con los registros como muestran las figuras 14 y 15.



Figura 14. Mediciones de componentes de rendimiento en plantas marcadas.



Figura 15. Racimos con flores abiertas y con frutos en diferentes estados de madurez.

El % de radiación interceptada por el cultivo se obtuvo a partir de mediciones con un aparato de análisis de dosel llamado SunScan tipo SS1 (Figuras 16 y 17). Con este instrumento se mide a la altura del alambre por encima del cultivo para conocer cuanta radiación llega, luego se mide debajo de las plantas encima de la fila y en la entre fila, finalmente promediando esos valores se obtiene la cantidad de radiación que logró pasar por el dosel de las plantas. Por diferencia entre lo que llega al cultivo y lo que logra pasar por el mismo se obtiene la cantidad de radiación interceptada por las plantas. Las mediciones se realizaron entre las 11.30 y 14:00 horas en días despejados y ubicando el instrumento perpendicular a la fila y en posición horizontal. Además se calculó el % de transmisividad del invernáculo como la diferencia relativa entre la cantidad de radiación incidente fuera del invernáculo y la medida a la altura del alambre encima del dosel del cultivo utilizando el instrumento mencionado antes.



Figura 16. SunScan tipo SS1.



Figura 17. Mediciones con el aparato SunScan tipo SS1.

Se evaluó el rendimiento del cultivo (kg/m^2) desde el inicio de la cosecha hasta los últimos días del año (29 o 30 de diciembre) para las dos zafras. Para ello se marcaba un cantero ubicado en el centro donde se colocó el sensor de temperatura y humedad relativa tal como muestra la figura 18. El mismo busca ser representativo de la situación promedio del cultivo y manejado por el productor de forma similar al resto del cultivo. Se consultaba al productor cuales serían los días de cosecha en la semana y si surgía alguna variante (feriados, paros, etc) a esos días se avisaba con la finalidad de contabilizar todas las cosechas del cultivo a lo largo de la zafra.



Figura 18. Cantero marcado para cosecha.

A continuación, se visitaban los cultivos los días de cosecha y se cosechaba de forma manual el cantero marcado con baldes de 20 kg. Con ayuda del personal de horticultura de la E.E.F.A.S, en los días donde el número de productores cosechando era alto se organizaban dos grupos de cosecha. Luego de cosechar el cantero se procedía a la clasificación, para ello se tomaron los calibres determinados por el mercado modelo como muestra el cuadro 3. Se contabilizaba número de frutos y peso (g) del total de frutos por calibre tal como muestra la figura 19.

Cuadro 3. Calibres utilizados en la clasificación de las cosechas.

Calibres	Diámetro ecuatorial (mm)
	Menos de 50
Chico	50-65
Mediano	65-80
Grande	80-100
Extra grande	Más de 100
Otros*	

(*) Incluye frutas con pudriciones, deformes, con daño por granizo, etc.

Fuente: elaborado con base en CAMM (2015).



Figura 19. Clasificación y pesaje de la cosecha en los diferentes calibres.

A partir de ello, se obtiene el número de frutos totales cosechados y peso total (Kg) en el cantero marcado. Conociendo la superficie del cantero (m^2) se obtuvo el rendimiento en $Kg.m^2$. También se estima el % de frutos perdidos entre cuajado y cosechados.

En relación a parámetros de calidad de fruta se mide el tamaño (mm) promedio ponderado por las diferentes categorías para cada sitio en evaluación y los descartes incluidos en la categoría “otros”.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En primer lugar se analizó y jerarquizó el efecto de los diferentes factores determinantes y condiciones ambientales sobre el rendimiento del cultivo de tomate. Para ello, se utilizó la metodología de análisis de senderos, partiendo de un modelo conceptual de explicación del rendimiento centrado en las variables de crecimiento y desarrollo del cultivo, y las variables de manejo asociadas a los factores determinantes del rendimiento. Este análisis se realizó para cada zafra por separado y luego ambas zafras juntas. Se realizó mediante el procedimiento CALIS del software SAS/STAT 9.2 (SAS, 2009). Con esta metodología se busca identificar los componentes de rendimiento más importantes y las condiciones ambientales responsables de las variaciones de rendimiento. El rendimiento se usó como la variable dependiente y los componentes del rendimiento y las condiciones ambientales como variables de predicción. A través de este análisis, la partición de los factores directos e indirectos en el rendimiento promedio se obtuvo como coeficientes de regresión estandarizados.

Una vez jerarquizadas las variables de crecimiento y desarrollo con efecto significativo sobre el rendimiento, se utilizaron gráficos de dispersión y boundary lines (BL) para analizar su comportamiento. Dado que para ambas zafras, la significancia y jerarquización de las variables de crecimiento y desarrollo fue similar en el análisis de senderos, el estudio de BL se realizó para ambas zafras conjuntamente, salvo que se señale lo contrario. Las BL fueron establecidas a través de boundary points correspondientes a la mayor respuesta de la variable dependiente (rendimiento kg/m^2) para cada valor de la variable independiente (Delmotte et al., 2011). Se ajustó un modelo de regresión no lineal ($y_i = \alpha / (1 + \beta \cdot \exp(-\gamma \cdot x_i)) + \delta$) y se evaluó su ajuste mediante el R^2 y la pendiente entre valores predichos y observados, utilizando el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2014).

Luego se analizaron las correlaciones de las diferentes variables evaluadas entre sí y con el rendimiento y se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2014).

Considerando la fuerte correlación entre la radiación PAR acumulada interceptada por cultivos y rendimiento se calculó la Brecha de Rendimiento Relativa (BRR_i), como: $BRR_i = (BL - RO_i) / BL$

Dónde,

BL es la estimación del rendimiento de la boundary line para cada valor interceptado de radiación PAR (fotosintéticamente activa) acumulada en el ciclo por cada cultivo.

RO_i es el rendimiento observado para cada cultivo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DE LAS ZAFRAS

Dentro de los factores determinantes del rendimiento en el cultivo de tomate se destacan la temperatura, la humedad relativa y la radiación (PAR). Por ello es relevante realizar una breve descripción climática de las zafras 2016 y 2017, con datos de radiación promedio diaria ($Mj/m^2/día$) de la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía Salto (EEFAS), y datos de temperatura ($^{\circ}C$) y HR (%) registrados por los sensores ubicados dentro de los invernáculos, mientras que los datos graficados son promedios obtenidos de la estación meteorológica INIA Salto Grande.

Cuadro 4. Datos climáticos de las zafras evaluadas.

VARIABLE	2016	2017	2 ZAFRAS
Temperatura media ($^{\circ}C$)	$17,9 \pm 0,8$	$18,7 \pm 1,06$	$18,3 \pm 1,0$
Temperatura mínima promedio ($^{\circ}C$)	$10,7 \pm 0,6$	$12,2 \pm 0,7$	$11,5 \pm 1,0$
Temperatura máxima promedio ($^{\circ}C$)	$31,8 \pm 1,0$	$30,7 \pm 2,0$	$31,2 \pm 1,7$
Humedad relativa media (%)	$80,2 \pm 2,7$	$81,0 \pm 3,6$	$80,6 \pm 3,2$
Radiación PAR diaria ($Mj.m^2$ día)	$3,3 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,6$

Los datos se presentan como la media \pm desvío estándar.

Como se observa en el cuadro 4 y las figuras 20 y 21, existieron diferencias climáticas entre las zafras estudiadas. En relación a la temperatura, la zafra 2016 presentó menor temperatura media, la mínima promedio fue $2^{\circ}C$ menos y la máxima promedio $1^{\circ}C$ más que la zafra 2017. Se analizaron las temperaturas máximas y mínimas promedio para cada sitio en meses de invierno (junio, julio y agosto) y primavera (setiembre, octubre y noviembre) para ambas zafras, y su relación con el % de cuajado y el rendimiento. No se pudieron observar relaciones significativas entre estos parámetros y los registros de temperatura. Además se analizaron los registros de los sensores y se obtuvo que en la zafra 2016 para los ciclos evaluados aproximadamente el 10% de la duración (días) de los mismos se registraron temperaturas inferiores a $10^{\circ}C$. Mientras que para el 2017 fue un 5% de la duración del ciclo.

En relación a la humedad promedio no existieron grandes diferencias entre zafra, aunque observando la evolución en los meses del año, en la zafra 2016 se superó el 80% a comienzos de abril mientras que en el 2017 fue en mayo. A partir de allí no hubo diferencias entre zafras hasta julio donde los registros en el 2017 comenzaron a ser levemente inferiores a 80% manteniéndose hasta el mes de setiembre donde bajó rápidamente. En cambio a partir de julio, los registros de la zafra 2016 comenzaron a descender a valores cercanos al 70%. Esto demuestra que más allá que el promedio de ambas zafras no fue tan diferente, en el 2017 hubieron registros superiores a 80% por más tiempo que en el 2016.

Por otro lado, se analizaron los datos de HR registrados por los sensores dentro de los invernáculos como muestra el cuadro 5. Se tomaron como criterios los valores de HR que afectan negativamente al % de cuajado (<50 y >90). Se calculó para cada zafra y tipo de ciclo el largo de ciclo promedio, la cantidad de horas que se registraron con valores de HR menores a un 50% y superiores a un 90% y la equivalencia de las mismas en días para finalmente saber qué % representan sobre la duración de cada ciclo. El tipo de ciclo se definió según fecha de trasplante y largo de ciclo. Como se puede observar -para todos los tipos de ciclo y zafra.- más del 30% de la duración del ciclo presentó valores de humedad relativa por encima del 90%, existiendo casos donde se superó el 40% (zafra 2016 ciclos de marzo).

Cuadro 5. Análisis de los registros de HR% <50 y >90 dentro de los invernáculos para ambas zafras según el tipo de ciclo.

Humedad relativa (%)		<50			>90		
Zafra 2016							
Ciclo	Largo ciclo promedio	Horas	Días	%	Horas	Días	%
Marzo	256	503	21	8	2572	107	42
Abril	244	598	25	10	2319	97	40
Mayo	213	535	22	10	1771	74	35
Zafra 2017							
Corto marzo	159	51	2	1	1208	50	31
Marzo	254	453	19	7,5	2106	88	35
Abril	232	435	18	8	1858	77	33
Mayo	198	406	17	9	1876	78	39

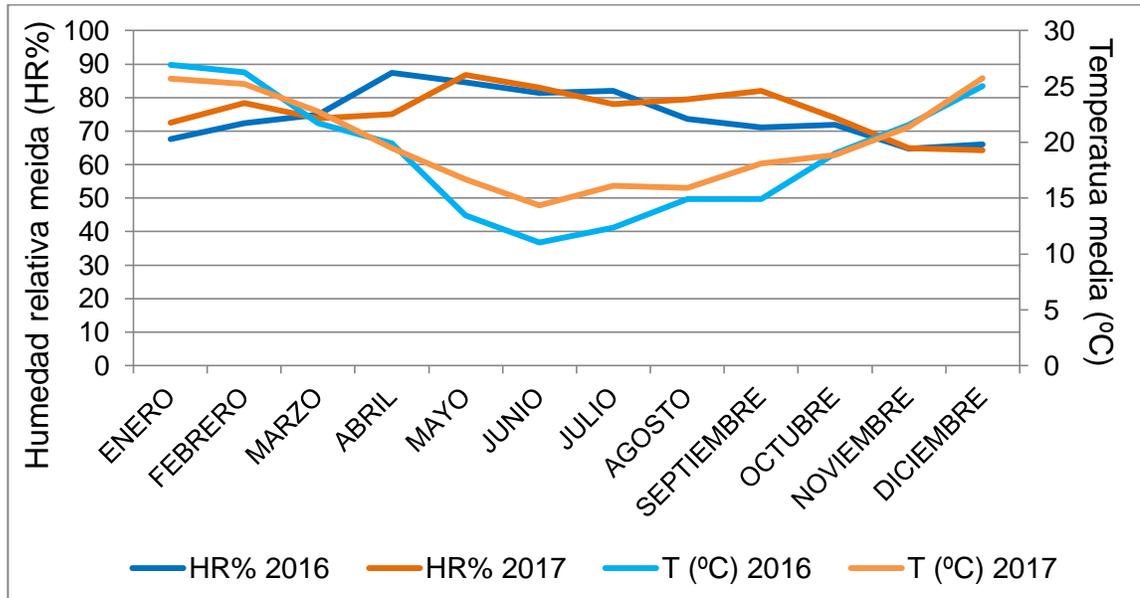


Figura 20. Registros mensuales de temperatura promedio y humedad relativa promedio para la zafra 2016 y 2017.

En relación a los registros de radiación PAR incidente promedio diaria (Mj/día) para ambas zafras no se observaron grandes diferencias. En la figura 21 donde se muestra la evolución de la radiación diaria promedio mensual se observaron diferencias entre ambas zafras. Desde enero hasta comienzos del otoño los valores de radiación fueron superiores en el 2016, a partir de allí hasta el mes de mayo fueron inferiores, para luego incrementar hasta mediados de junio donde a partir de allí no hubieron tantas diferencias entre zafras hasta mediados de setiembre. Por ende gran parte del otoño 2016 presentó registros menores de radiación, con excepción del mes de mayo donde la zafra 2017 tuvo los valores más bajos de radiación para ambas zafras. El invierno no presentó grandes diferencias en ambos años. En la primavera si se puede observar que la zafra 2017 se diferenció notoriamente de la 2016, presentando valores de radiación altamente superiores.

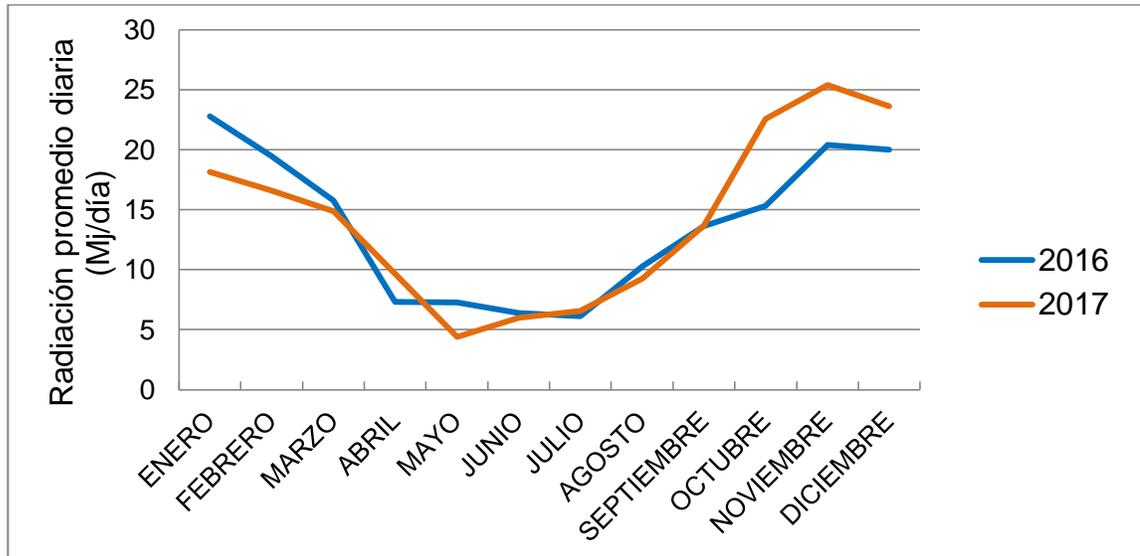


Figura 21. Registros mensuales de radiación promedio diaria (Mj/día) para la zafra 2016 y 2017.

4.2 CUANTIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO

En ambas zafras se observó una alta variabilidad en los rendimientos obtenidos, reflejándose en el coeficiente de variación de 36% y 35% para el 2016 y 2017, respectivamente como se observa en el cuadro 6.

La diferencia que existe entre cada valor de rendimiento observado y el mejor rendimiento para cada nivel de radiación PAR acumulada fue en promedio para ambas zafras de 27,7%.

Estos resultados demuestran una gran variabilidad entre los rendimientos obtenidos en los sitios de producción de tomate bajo invernáculo en Salto, coincidiendo con estudios realizados por Berrueta et al. (2012) en tomate de industria en el sur, Bordenave (2013) en frutilla en la zona de Salto y Berrueta¹ en tomate bajo invernáculo en el sur para dos zafras 2014/2015 y 2015/2016. Este último estudio mostró una brecha de rendimiento relativa de 32%.

¹ Berrueta, C. 2018. Com. personal.

Cuadro 6. Estadísticas descriptivas simples para ambas zafras.

Variable	2016	2017	2 zafras
Kg/m ² promedio	10,9 ± 3,96	11,30 ± 3,98	11,11 ± 3,95
Brecha rendimiento relativa (%)	29,8	25,8	27,7
Rendimiento máximo (kg/m ²)	21,35	19,57	
Rendimiento mínimo (kg/m ²)	4,30	3,20	
Largo de ciclo promedio (días)	234 ± 27	217 ± 35	225 ± 32
Periodo entre trasplante e inicio de cosecha (días)	129	109	

Los datos se presentan como la media ± desvío estándar.

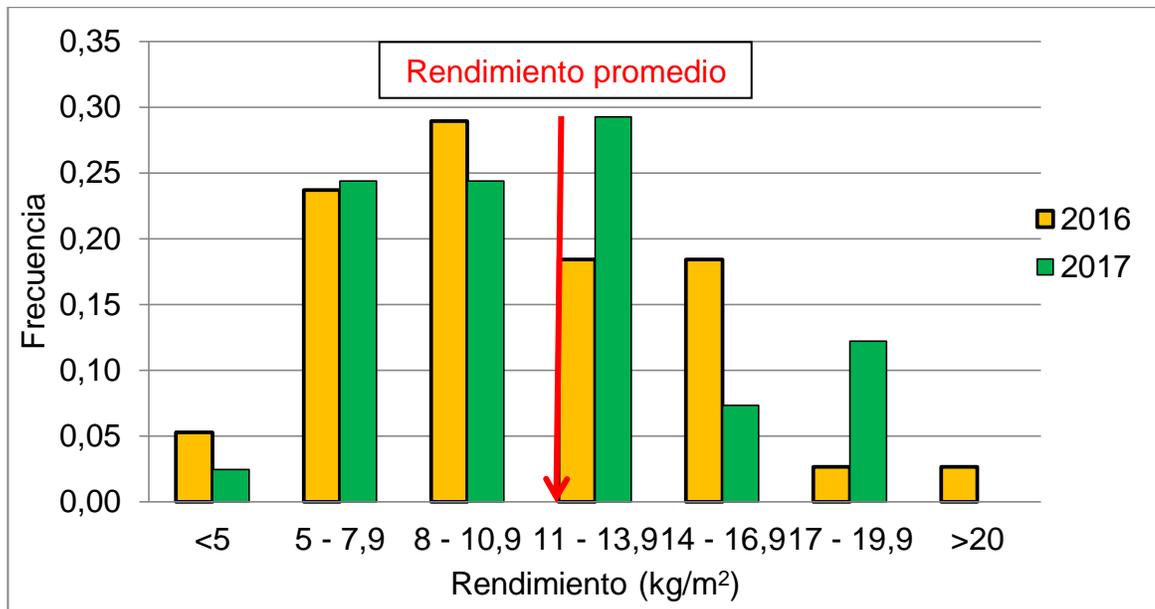


Figura 22. Frecuencia de cultivos según rango de rendimientos para las zafras 2016 y 2017.

En la figura 22 se puede observar las diferencias entre zafras para la frecuencia de cultivos dentro de cada rango de rendimientos. Se puede concluir que para los rangos comprendidos entre 5 y 10,9 kg/m² no hay diferencias en la frecuencia de cultivos entre ambas zafras. En los rangos de rendimiento superior a 11 kg/m² hasta 20 kg/m² se observaron diferencias en la frecuencia

de cultivos entre zafras. Una posible explicación podría ser por diferencias productivas entre años entre los productores.

En la zafra 2016 el 58% de los cultivos obtuvieron un rendimiento inferior al promedio, mientras que en la zafra 2017 fue de un 51% de las observaciones. El rendimiento promedio de la zafra 2017 fue levemente superior que la 2016, y ésta última presentó una BRR mayor.

Otro parámetro importante a señalar fueron los días entre trasplante y cosecha, donde en promedio se diferenciaron en 20 días. Esto se relaciona con las temperaturas medias inferiores del 2016 principalmente en el otoño donde fueron los trasplantes, lo que produjo una disminución en la tasa de desarrollo del cultivo y por ende un alargamiento de dicha etapa. Similares resultados fueron reportados por Calvert (1959), De Koning (1994), quienes indican que la tasa de aparición de hojas, la aparición de la primera inflorescencia y la entrada en producción de fruta son parámetros influenciados por la temperatura y la radiación. En la zafra 2016 donde a partir de mayo se registran los valores más bajos de temperatura y radiación existe efecto sobre la duración del periodo de desarrollo de los primeros frutos alargando el tiempo entre cuajado y maduración. La zafra 2017 presentó un comportamiento contrario debido a mayor temperatura promedio.

A los efectos de realizar un estudio más detallado se clasificaron cuatro tipos de ciclos en relación a su fecha de trasplante y largo de ciclo, para así poder efectuar comparaciones de los diferentes parámetros evaluados como muestra el cuadro 7.

Cuadro 7. Tipos de ciclos de cultivos evaluados.

TIPO DE CICLO	LARGO DE CICLO (días)	FECHA DE TRASPLANTE	FECHA FIN DE CICLO
Corto de marzo	< 180	Marzo	Agosto
Largo de marzo	>=180	Marzo	Fin noviembre a diciembre
Abril	>=180	Abril	Fin noviembre a diciembre
Mayo	>=180	Mayo	Fin noviembre a diciembre

Se analizaron los rendimientos y el número de racimos promedio para cada tipo de ciclo en ambas zafras como muestra el cuadro 8. El cultivo corto de marzo con un largo de ciclo menor (160 días en promedio) y por ende un menor número de racimos presentó el menor rendimiento. En el caso de los tres

tipos de ciclos largos (>180 días) presentaron un mayor número de racimos por planta y por ende rendimientos superiores. Comparando el ciclo de marzo y de mayo, el primero presenta 13 racimos/ planta mientras que el segundo 11 racimos/ planta en promedio, lo que implica diferencias en el número de frutos/planta y por ende frutos/m². Debido a esto, el ciclo largo de marzo presentó en promedio mayor rendimiento que el de mayo. La diferencia que presentan estos ciclos son la fecha de trasplante que determina las condiciones ambientales de la estación de crecimiento para cada cultivo y el manejo de la planta (p.ej: número de bajadas de la planta, cantidad de deshojes).

Un cultivo con trasplante en marzo, comienzo de cosecha en julio presenta el periodo de cuajado de fruta en condiciones de temperatura y radiación decrecientes desde valores superiores al comienzo (principios del otoño) a valores bajos a inicio del invierno, además se realizan un mayor número de bajadas de planta para su conducción asociado a un mayor número de deshojes. Un cultivo con trasplante en el mes de mayo, presenta el periodo de cuajado de fruta en pleno invierno con los registros de radiación y temperatura medias más bajos del año, y comienzo de cosecha en setiembre coincidiendo con los picos de precios del mercado modelo en ese periodo. Asociado al manejo de planta, se reducen el número de bajadas y deshojes por lo que la planta presenta menos situaciones limitantes como esas. El ciclo de abril se maneja como una situación intermedia entre las dos anteriores.

Comparando esas dos situaciones productivas y los rendimientos obtenidos los productores se podrían plantear sacrificar producción con la finalidad de ubicar parte de la cosecha en los meses de mayores precios.

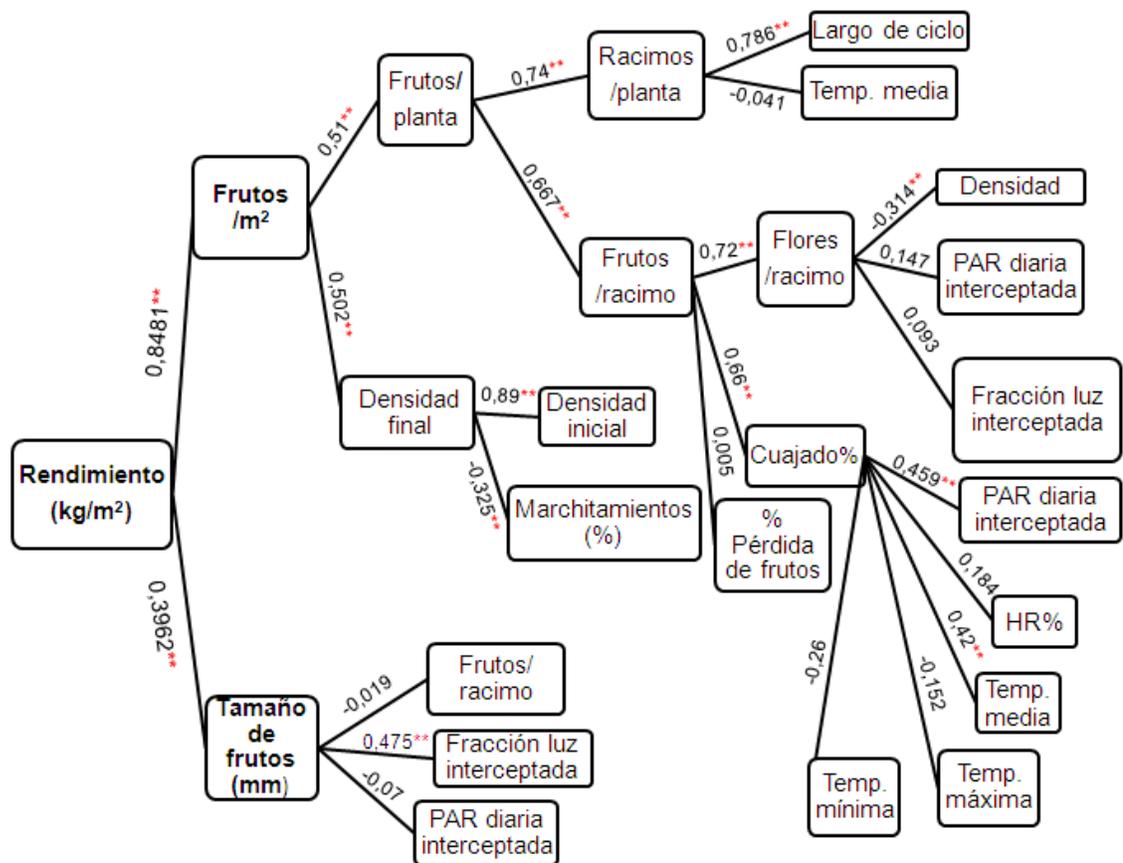
Cuadro 8. Rendimientos promedio de ambas zafras y no. de racimos/planta según el tipo de ciclo.

Tipo de ciclo	Rendimiento promedio (kg/m ²)	No. racimos/planta promedio
Corto de marzo	8,66	9
Largo de marzo	12,25	13
Abril	11,91	12
Mayo	10,55	11

4.3 EFECTO DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A FACTORES DETERMINANTES SOBRE LOS COMPONENTES DE RENDIMIENTO

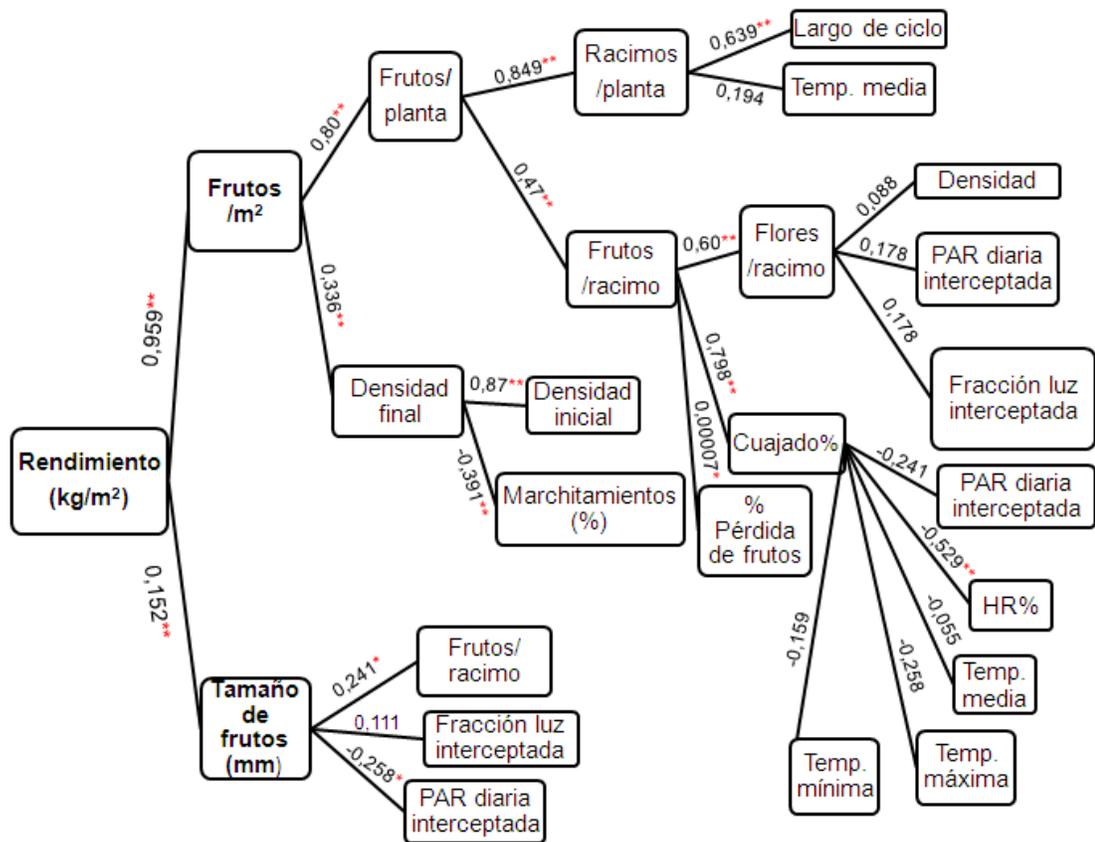
Mediante el análisis de sendero se pudo estudiar los efectos de los diferentes componentes de rendimiento y las condiciones ambientales en la formación del rendimiento en el cultivo de tomate, ya que son las principales causas de las variaciones observadas en los rendimientos obtenidos.

Previamente se construyó el mapa de formación del rendimiento con las principales variables que lo determinan. Luego, se efectuaron los análisis para cada zafra individual y con ambas juntas para poder estudiar el efecto año en los resultados como muestran las figuras 23, 24 y 25.



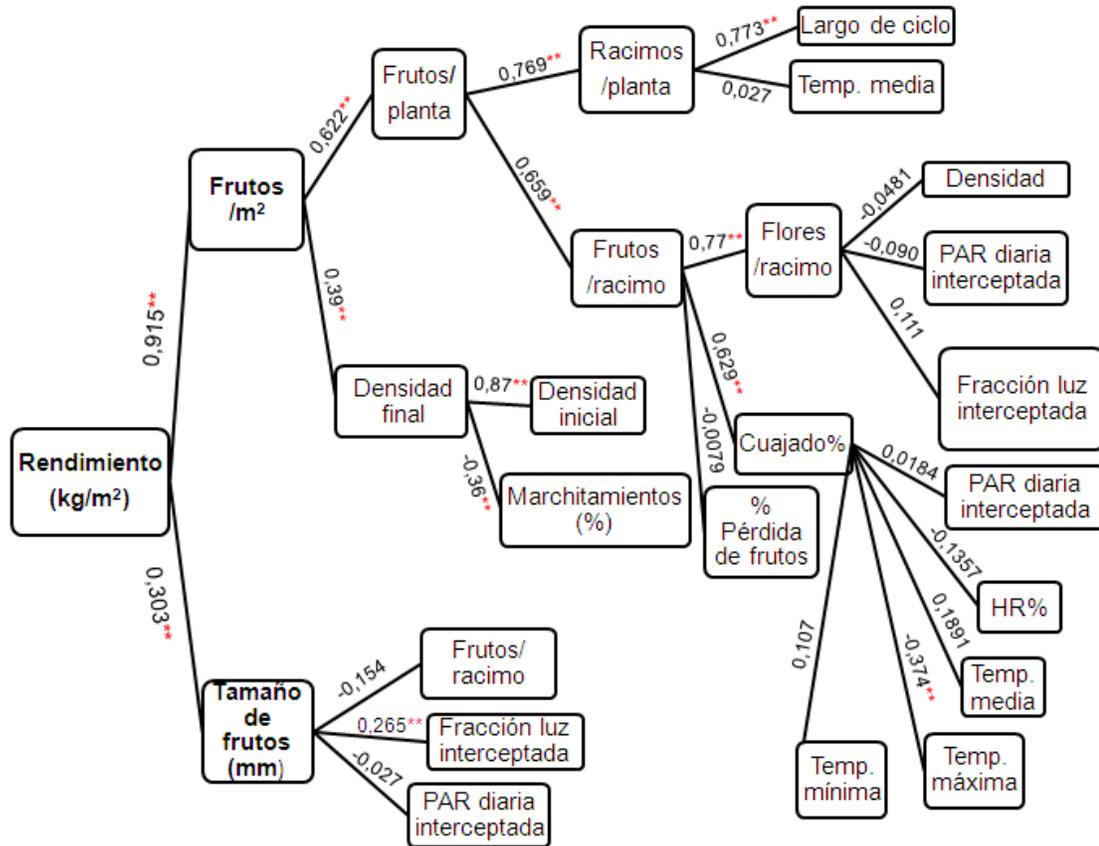
Las flechas indican los efectos directos estandarizados y los coeficientes de sendero, se distinguen con ** y *, p-valor <0.05 y <0.10 respectivamente.

Figura 23. Mapa de análisis de senderos con los componentes de rendimiento y condiciones ambientales para la zafra 2016.



Las flechas indican los efectos directos estandarizados y los coeficientes de sendero, se distinguen con ** y *, p-valor <0.05 y <0.10 respectivamente.

Figura 24. Mapa de análisis de senderos con los componentes de rendimiento y condiciones ambientales para la zafra 2017.



Las flechas indican los efectos directos estandarizados y los coeficientes de sendero, se distinguen con ** y *, p-valor < 0.05 y < 0.10 respectivamente.

Figura 25. Mapa de análisis de senderos con los componentes de rendimiento y condiciones ambientales para ambas zafas juntas.

El rendimiento obtenido en ambas zafas estuvo relacionado con mayor coeficiente de correlación con los frutos por m² (2016: 0,85, 2017: 0,96 y ambas zafas juntas: 0,91; p-valor < 0,0001, figura 26); y en menor medida pero también significativo por el tamaño de frutos (coeficientes de correlación: 2016: 0,39, 2017: 0,15 y ambas zafas: 0,30; p-valor < 0,0001).

Se analizó la relación entre el tamaño de frutos y el número de frutos por m², arrojando una correlación no significativa con un coeficiente de Spearman igual a -0.18. En la figura 27 se observa que independientemente del número de frutos por m² el tamaño de los mismos se encuentra comprendido en un rango entre 60 y 80mm (6 y 8 cm de diámetro), siendo los calibres con mejores precios en el mercado modelo. Además no se observa tampoco una relación entre los tipos de ciclo y el tamaño promedio. Esto implica que los

frutos por m² en este trabajo no estarían siendo limitantes para definir el tamaño.

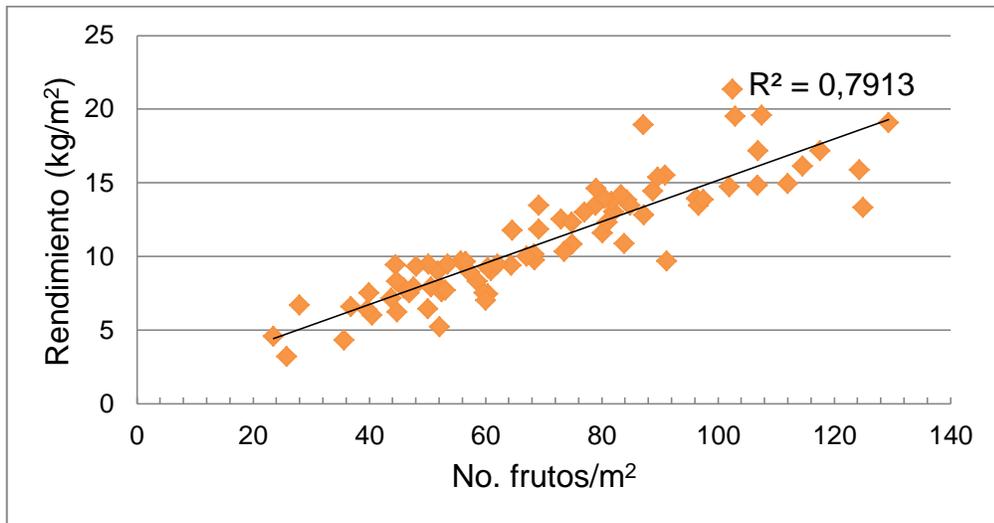


Figura 26. Rendimiento (kg/m²) en función del número de frutos/m² para ambas zafras.

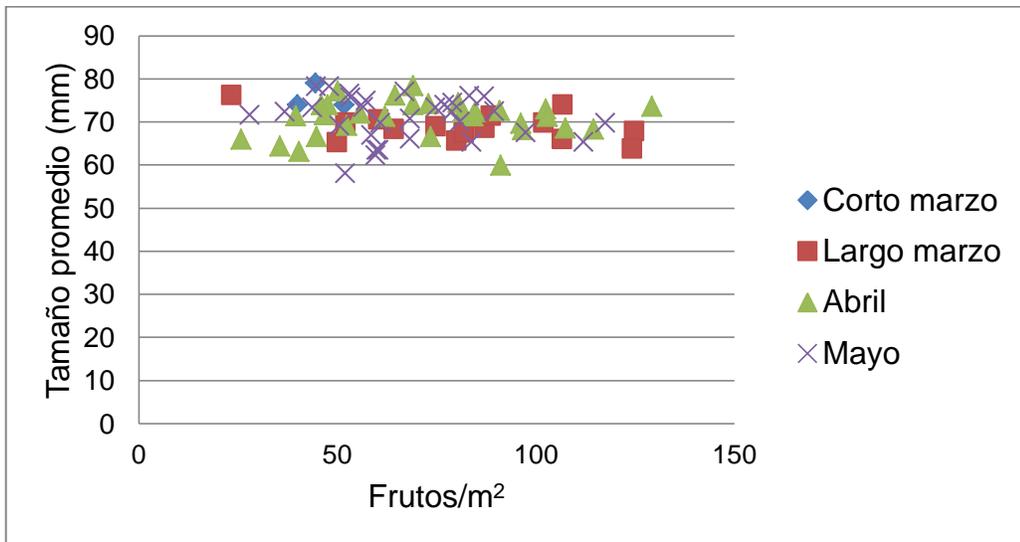
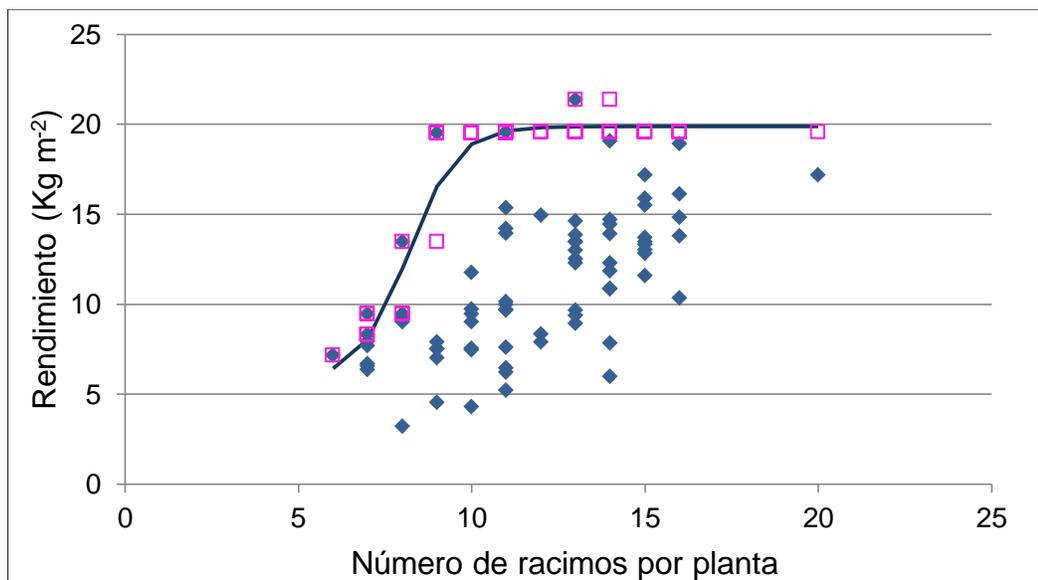


Figura 27. Tamaño de frutos (mm) en relación al no. de frutos/m² para ambas zafras.

Para los tres casos analizados, el número de frutos por m² estuvo fuertemente asociado con el número de frutos por planta, lo que se relacionó con el número de racimos por planta y el número de frutos por racimo. El número de racimos por planta se asoció positivamente con el largo del periodo

de crecimiento, mientras que no se encontró relación con la temperatura media. Esto implica que, una primera idea en busca de aumentar el rendimiento es apuntar a incrementar el número de frutas por unidad de superficie principalmente aumentando el número de frutas por planta en mayor medida, aunque la densidad (número de plantas por unidad de superficie) también se relacionó de forma significativa pero con un coeficiente de sendero menor.

Además, la duración del periodo de crecimiento determinó la cantidad de racimos por planta y por ende el rendimiento. Como se observa en la figura 28 se logró superar el rendimiento promedio de ambas zafras cuando el número de racimos por planta fue mayor a 8. A partir de los 10 racimos por planta la curva de rendimiento alcanza la asíntota en aproximadamente los 20 kg/m², donde a partir de allí incrementos en el número de racimos (de 10 a 20 racimos/planta) no se tradujeron en un incremento en el rendimiento. También se observa la gran variabilidad de rendimientos a un mismo número de racimos, por ejemplo con 14 racimos por planta existen cultivos con rendimientos en un rango de 6 kg/m² como mínimo y 19,6 kg/m² como máximo. Esta brecha demuestra el efecto que presentan los factores limitantes y reductores del rendimiento, asociados al manejo del cultivo por parte de cada productor.



Rendimiento real (♦), boundary points (□) y la línea boundary ajustada para los rendimientos máximos ($y_i = 14,07 / (1 + 109800,9 * \exp(-1,42 * x_i)) + 5,81$).

Figura 28. Relación entre el rendimiento y el número de racimos por planta para ambas zafras.

La cantidad de fruta por racimo se relacionó significativamente con el número de flores por racimo y el % de cuajado, siendo los coeficientes de sendero mayores a 0,7 y 0,6 respectivamente. Pero no existió relación significativa con el % de pérdidas de fruta entre cuajado y cosecha en ninguna de las zafas analizada. Lo que implica que para aumentar el número de frutos/racimo, el % de cuajado presenta mayor peso que las pérdidas ocurridas luego del cuajado hasta la cosecha. Pero, esto no significa que no sea importante disminuir esas pérdidas de fruta ya que al relacionarla directamente con el rendimiento se observó efecto significativo (p -valor= 0,0001) con un coeficiente de Spearman de -0,42, lo que implica que en la medida que se reduzcan dichas pérdidas el rendimiento final aumenta. No se puede decir con precisión las causas de dichas pérdidas ya que algunos productores declararon realizar raleo de fruta mientras que otros no, además la pérdida de fruta por *Botrytis* fue severa en muchos cultivos.

En relación a las flores por racimo se analizaron como efectos directos la densidad, la radiación PAR interceptada diaria y la fracción de luz interceptada (IAF indirecto). Solamente en la zafa 2016 la densidad tuvo un efecto significativo con un coeficiente de sendero negativo (- 0,314), lo que implica que en la medida que se incrementa el número de plantas por m^2 el número de flores por racimo disminuyó en esta zafa.

Para el caso del % de cuajado también existieron diferencias entre zafas, donde se relacionó significativamente y con coeficientes positivos en el 2016 con la radiación PAR diaria interceptada (0,459) y la temperatura media (0,42). En el 2017 solamente fue significativa y con relación negativa la humedad relativa (-0,53), mientras que en ambas zafas juntas la temperatura máxima tuvo relación negativa (-0,37) y significativa con el cuajado.

Incrementos en la cantidad de radiación PAR interceptada incrementaron el % de cuajado. Esto se debe a que a mayor luz mayor TAB y por ende mayor cantidad de asimilados para el cuajado de los frutos. La radiación PAR diaria interceptada es una variable determinada por la cantidad de luz incidente en el cultivo (dependiente de la radiación solar incidente según la época del año, el % de transmisividad del invernáculo) y el área foliar, presentando un efecto directo en la relación fuente-fosa y la asignación de asimilados dentro de la planta como señalan Heuvelink y Dorais (2005a).

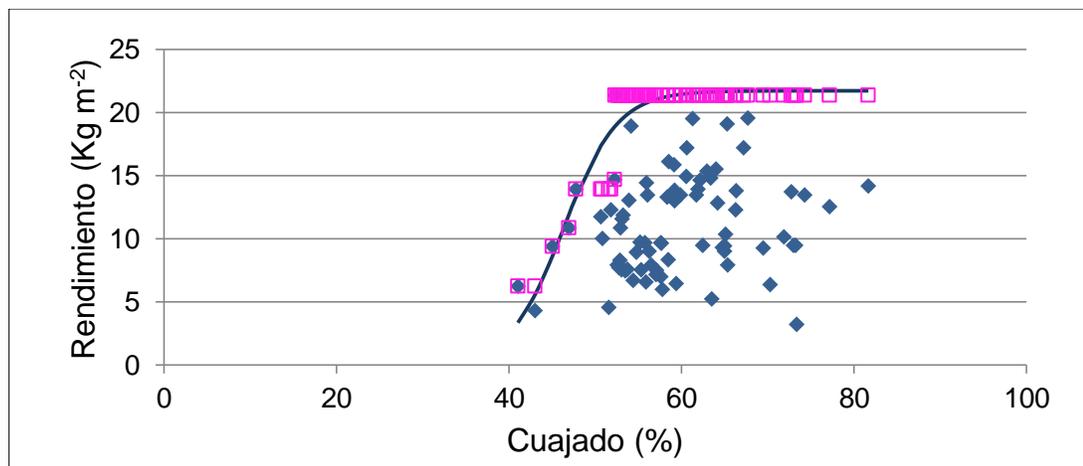
También la temperatura media estuvo relacionada de forma positiva con el cuajado. Bajo condiciones de temperaturas medias inferiores y registros de temperaturas bajo cero como sucedió en la zafa 2016 respecto a la 2017 el % de cuajado disminuyó. A ser el 2016 un año más frío, se observó el efecto significativo de temperaturas medias superiores en el % de cuajado. Chamorro (1995) menciona que la temperatura óptima para la germinación del polen es de

21°C, en ambas zafas la temperatura promedio estuvo por debajo de ese valor por lo que se pudo haber afectado el proceso.

En el año 2017, la humedad relativa se relacionó negativamente con el cuajado. En la medida que aumentó la humedad relativa dentro del invernáculo el % de cuajado disminuyó. Esto coincide con lo analizado a partir de la figura 20, donde en la zafra 2017 existió un periodo mayor de valores de HR superiores a 80%. Este resultado concuerda con lo reportado por Bakker (1990) quien indica que el rendimiento final se reduce bajo condiciones de alta humedad, en este trabajo la relación entre el rendimiento y la HR fue negativa y significativa (coeficiente Spearman= -0,3, p-valor= 0,0006).

Cuando se analizan las dos zafas juntas observamos que la temperatura máxima tuvo efecto negativo y significativo sobre el % de cuajado.

Como se muestra en la figura 29 para lograr el rendimiento promedio de ambas zafas se debió superar el 45 % de cuajado. Para obtener un rendimiento cercano a los 20 kg/m² se debió alcanzar 55 % de cuajado, a partir de ese valor la curva llega a la asíntota y aumentos en el % de cuajado no se expresaron en un rendimiento superior.



Rendimiento real (♦), boundary points (□) y la línea boundary ajustada para los rendimientos máximos ($y_i = 21,74 / (1 + 2770313,54 * \exp(-3,2 * x_i))$).

Figura 29. Relación entre el rendimiento y el % de cuajado para ambas zafas.

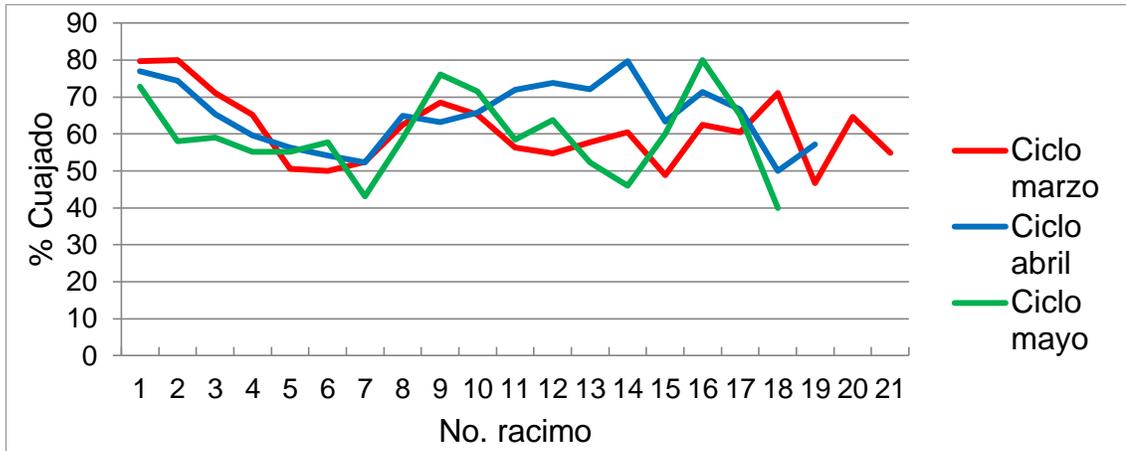


Figura 30. Evolución del % de cuajado en función del racimo para cada tipo de ciclo.

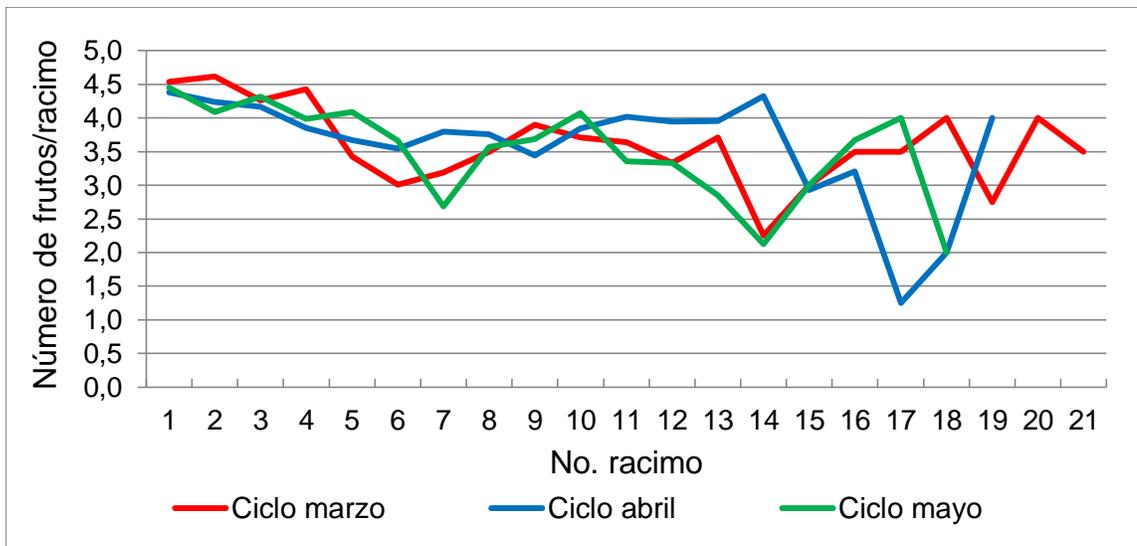


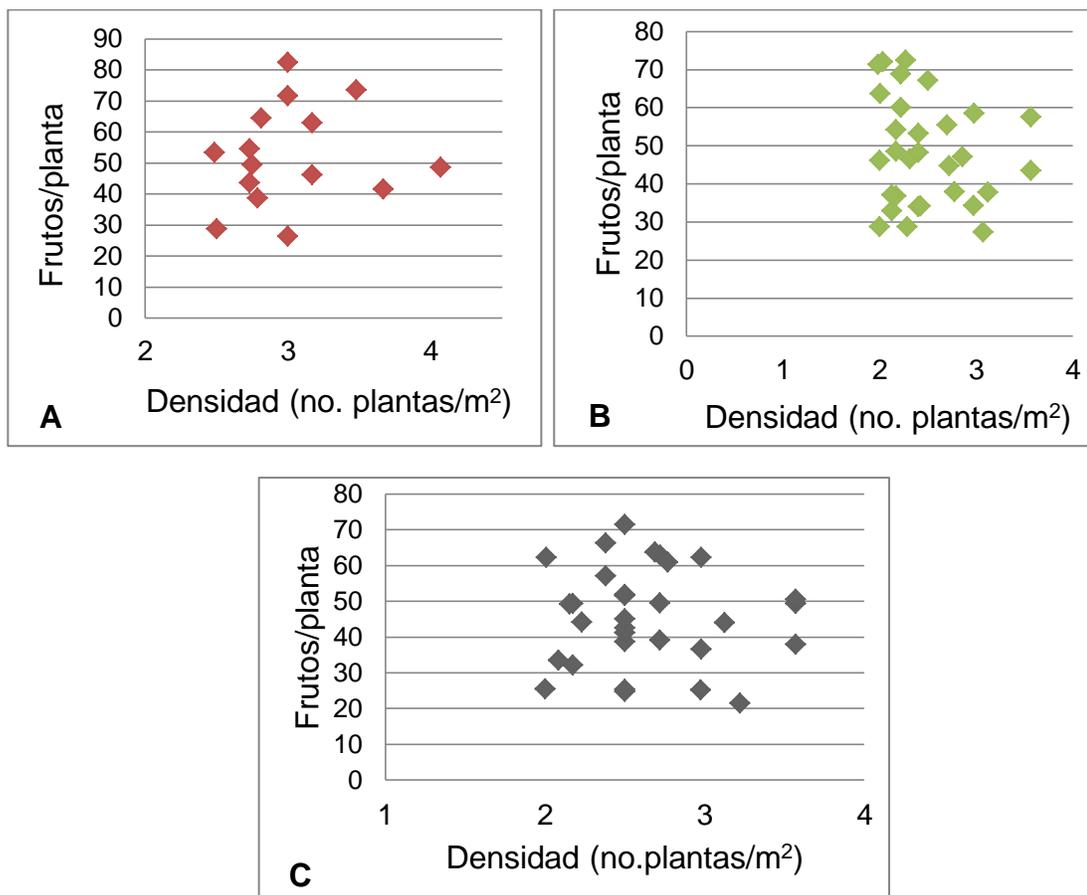
Figura 31. Evolución del número de frutos/racimo en función del número de racimo para cada tipo de ciclo.

La figura 30 muestra las oscilaciones en los % de cuajado de los diferentes racimos dentro de la planta para los tres ciclos analizados. Se observa que el primer racimo presenta los valores más altos de cuajado, y que este decrece hasta el 7^{mo}. u 8^{vo}. racimo. El ciclo de mayo fue el que presentó menores valores de % de cuajado inicial debido a las bajas temperaturas medias y bajos niveles de radiación incidente de la época. Luego del 8^{vo}. racimo el % de cuajado se incrementó porque comienza la cosecha de los racimos inferiores por ende mejora la relación fuente/fosa. En la figura 31 se observa la

misma tendencia vista con el % de cuajado pero con el número de frutos por racimo, donde a partir del primer racimo hasta el 7^{mo}. u 8^{vo}. decrece para luego incrementar debido al inicio de la cosecha. Esto evidencia que la falta de manejo de la carga por parte de los productores como ser el raleo de fruta incide en dichas oscilaciones. Este comportamiento es mencionado reiteradamente, siguiendo el concepto de equilibrio vegetativo y reproductivo y oscilaciones de carga de fruta por varios autores como ser Lovenstein et al. (1993), De Koning (1994), Heuvelink (1996), Marcelis (1996), Dogliotti et al. (2011).

Como se mencionó anteriormente, la densidad final se relacionó significativamente en los tres casos con los frutos/m² aunque con coeficientes de sendero menores que los frutos/planta. Esto implica que en la medida que se incrementó el número de plantas por m², dentro del rango observado en la zona en estas dos temporadas, el número de frutos aumentó y esto derivó en un incremento del rendimiento. La densidad y el número de frutos por planta no se correlacionaron en forma significativa. En la figura 32 puede observarse una tendencia de que luego de 2 a 2,5 plantas por m² reduce en los tres ciclos el número de frutos por planta, destacándose la gran variabilidad de no. frutos/planta a una misma densidad. Para el ciclo de marzo se observó un valor máximo de 83 frutos/planta a una densidad de 2,5 plantas/m² que disminuye en la medida que se incrementa la densidad a valores de 50 frutos/planta cuando hay 3,5 plantas/m². Para el ciclo de abril se observó un valor máximo de 72 frutos/plantas a una densidad de 2 plantas/m² que disminuye a valores de 45 frutos/planta a una densidad de 3,5 plantas/m². Para el ciclo de mayo es la misma tendencia partiendo de 70 frutos/planta a una densidad de 2,5 plantas/m² hasta 38 frutos/planta cuando la densidad aumenta a 3,5 plantas/m².

Dogliotti (1997) encontró que en morrón comparando densidades de 1.6, 3.2 y 4.7 plantas por m², se redujo el número de frutos por planta debido a una menor disponibilidad de asimilados por planta a mayor densidad. Pero el número de frutos por m² y el rendimiento fue mayor a mayor densidad.



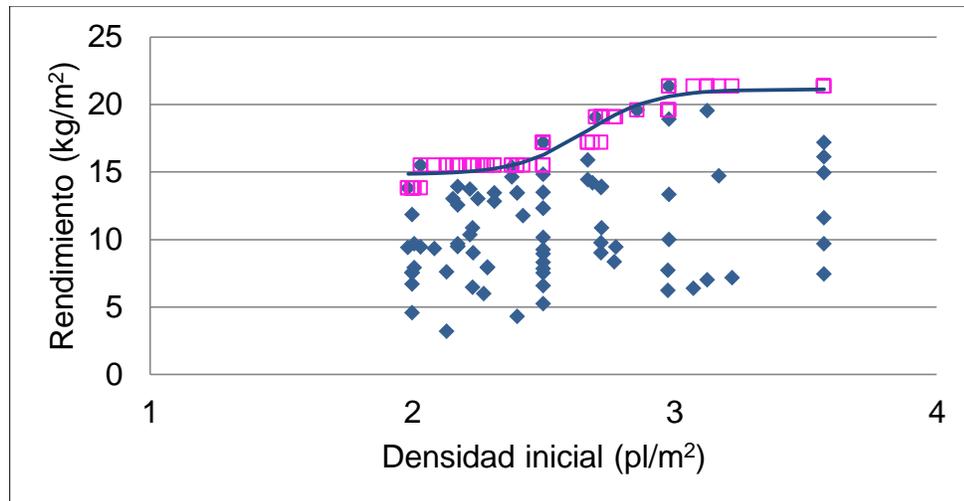
A. Ciclo largo de marzo, B. Ciclo de abril, C. Ciclo de mayo.

Figura 32. Número de frutos por planta en función de la densidad de plantación.

Como se observa en las figura 33, 34 y en el cuadro 9, existe una relación significativa entre el rendimiento (kg/m^2) y la densidad con un coeficiente igual a 0,24 ($p\text{-valor} < 0,05$), también se observó en los mapas de sendero su efecto indirecto en el rendimiento a través de su relación positiva y significativa con los frutos/ m^2 . Al realizar el análisis de correlación por ciclo se observa que en el único caso donde existe relación significativa y positiva (coeficiente de Spearman=0,62, $p\text{-valor}=0,0138$) con el rendimiento es para el ciclo largo de marzo. No hubo relación entre densidad y frutos/racimo (-0,12 y $p\text{valor}, 0,2912$).

Se observó entonces que el efecto de la densidad de plantación fue significativo y positivo sobre la cantidad de frutos por unidad de superficie, lo que implica que existe espacio para aumentar la densidad sin afectar el cuajado por planta y por ende incrementar el rendimiento.

En la figura 33 se observó que todas las densidades de plantas evaluadas permitieron alcanzar el rendimiento promedio para las dos zafras (11 kg/m^2), sin embargo, solo los cultivos con aproximadamente 3 plantas/ m^2 lograron rendimientos de 20 kg/m^2 . Se pasa de un rendimiento alcanzable de 15 kg/m^2 con 2 plantas/ m^2 a 20 kg/m^2 con 3 plantas/ m^2 .



Rendimiento real (\blacklozenge), boundary points (\square) y la línea boundary ajustada para los rendimientos máximos ($y_i = 6,31 / (1 + 489575776 * \exp(-7,52 * x_i)) + 1,48$).

Figura 33. Relación entre el rendimiento y la densidad inicial para ambas zafras

Cuando se analiza el efecto de la densidad por tipo de ciclo vemos que no es igual para todos tal como señala la figura 34. Los máximos rendimientos de cultivos con trasplante en marzo se obtuvieron con 2,5 plantas/ m^2 luego el rendimiento tendió a disminuir, mientras que los ciclos de abril y mayo alcanzaron los mayores rendimientos con 3 plantas/ m^2 . Este comportamiento puede deberse a las condiciones ambientales en cada ciclo. El ciclo de marzo tiene un periodo más largo de producción durante el invierno con condiciones de muy baja disponibilidad de luz. Por otro lado el ciclo de mayo, presenta mayor periodo de producción durante la primavera en condiciones de luz crecientes por lo que se podría incrementar el número de plantas por m^2 . Similares resultados fueron reportados por Castilla (1995), Heuvelink y Dorais (2005a), quienes indican que la densidad de plantación debe optimizar la intercepción de radiación especialmente en la época invernal, y que se comienza con densidades bajas en invierno, y en primavera se puede incrementar conservando uno o dos brotes laterales.

forma consistente en ambas zafras el tamaño de fruto. La fracción de luz interceptada fue significativa solo en 2016 y en el análisis de ambas zafras juntas (coeficientes=0,475 y 0,265 respectivamente), mientras que en la zafra 2017 fue significativa pero con coeficiente negativo la PAR diaria interceptada (coeficiente=-0,2582, p-valor= <0,1) y los frutos/racimo fueron significativos con un coeficiente igual a 0,24 (p-valor=0,1).

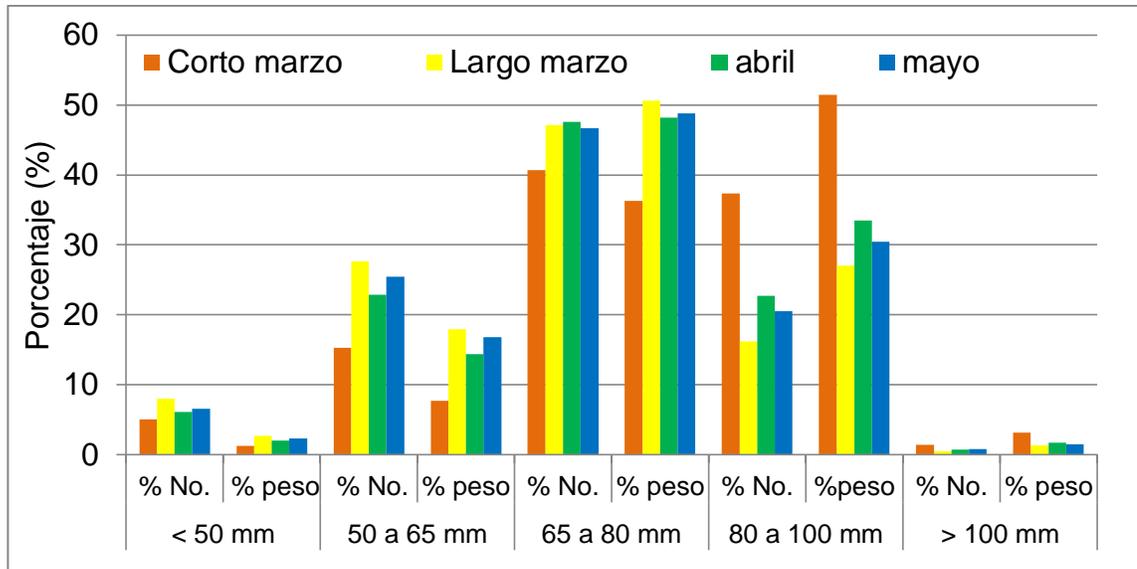


Figura 35. Distribución porcentual del número y peso de cada calibre según los tipos de ciclos.

Analizando la figura 35 donde se graficó la distribución porcentual sobre el total de número de frutos y peso (gramos) de cada categoría de tamaño de fruta evaluadas en las cosechas, para cada tipo de ciclo se observó que: para los ciclos largos de marzo, abril y mayo la categoría que corresponde a los calibres comprendidos entre 65 a 80 mm fue la que representó el mayor porcentaje (cercano al 50%) en número y peso de frutos totales cosechados. Luego el resto se distribuyó de forma más o menos similar en proporción en las otras categorías. Las frutas de calibre pequeño representan mucho en número de frutos cosechados pero poco en el peso y por ende en el rendimiento.

El ciclo corto de marzo presenta ciertas diferencias con el resto, ya que la categoría entre 65 a 80 mm representó el 40 % del número de frutos cosechados, pero los calibres entre 80 a 100 mm también representaron un valor cercano al 40% del número. En cambio la categoría que tuvo más influencia en el peso fue la de 80 a 100 mm representando más del 50%, seguida por la de calibres entre 65 a 80 mm que representaron el restante 40%.

Asociado con lo anterior se analizó la relación entre el largo del ciclo y el tamaño promedio de los frutos, resultando en una correlación significativa (p-valor= 0,0014) y negativa con un coeficiente de Spearman de -0,35. En el ciclo corto de marzo, donde el periodo entre cuajado y maduración de fruta es mayor debido a las condiciones de temperaturas bajas del invierno se obtiene fruta de mayor tamaño. Lo mismo señala De Koning (1994) donde menciona que la temperatura es el factor ambiental que determina el largo del periodo de crecimiento de fruto y en la medida que esta sea baja el tamaño potencial del fruto aumenta ya que dispone de más días para crecer. Además estos ciclos cortos de invierno con fin de cosecha en agosto se capan con 7-8 racimos eliminando la competencia por crecimiento de nuevas fosas vegetativas y reproductivas, lo cual favorece el tamaño de fruto.

Cuadro 9. Correlaciones de Spearman entre el rendimiento de los cultivos y los componentes del rendimiento y las condiciones ambientales.

Componentes de rendimiento y condiciones ambientales	Coeficiente de correlación de Spearman	p-valor
Largo ciclo (días)	0,46	< 0,0001
Periodo de cosecha (días)	0,57	< 0,0001
% Cuajado	0,24	0,0332
% Pérdida de frutos	-0,42	0,0001
PAR diaria interceptada (Mj/m ² /día)	0,32	0,0046
PAR interceptada acumulada (Mj/m ²)	0,52	< 0,0001
Fracción PAR interceptada (%)	0,44	0,0001
Frutos/m ²	0,92	< 0,0001
Racimos/planta	0,62	< 0,0001
Frutos/planta	0,55	< 0,0001
Flores/planta	0,43	0,0001
Densidad inicial (plantas/m ²)	0,24	0,0313
Temperatura promedio (°C)	0,32	0,0044
Humedad relativa promedio (%)	-0,38	0,0006

Las correlaciones son significativas si el valor $p \leq 0.05$.

Tanto la PAR diaria interceptada y la acumulada en el ciclo presentaron relación significativa con el rendimiento, siendo esta última la que presenta un coeficiente de correlación mayor. Esto último concuerda con lo reportado por Lovenstein et al. (1993) que la radiación incidente es uno de los principales factores determinantes del rendimiento potencial. Mientras que Picken et al. (1986) mencionan que el factor que más afecta es la iluminación diaria total, en este trabajo la cantidad acumulada a lo largo del ciclo presentó un coeficiente de correlación mayor que la cantidad diaria.

Asociada a estas variables la fracción de PAR interceptada por el cultivo también presenta relación significativa con el rendimiento. Tanto la PAR diaria (coeficiente de correlación de Spearman= 0,42, valor de $p=0,0001$), y la acumulada (coeficiente de correlación de Spearman= 0,26, valor de $p=0,0230$) en el ciclo se correlacionaron positivamente con él % de transmisividad del invernáculo como se muestra en la figura 36.

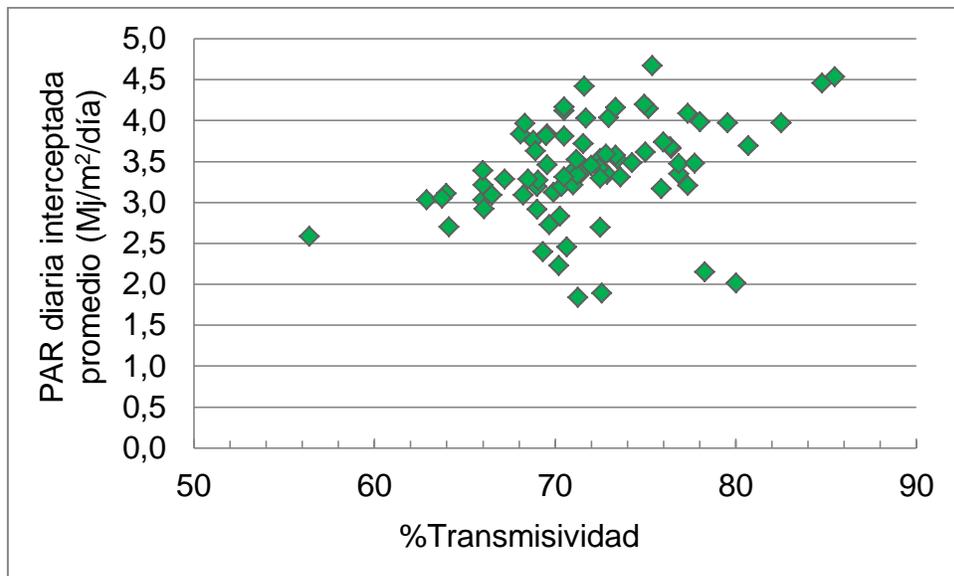


Figura 36. PAR diaria interceptada promedio ($Mj/m^2/día$) según él % de transmisividad del invernáculo.

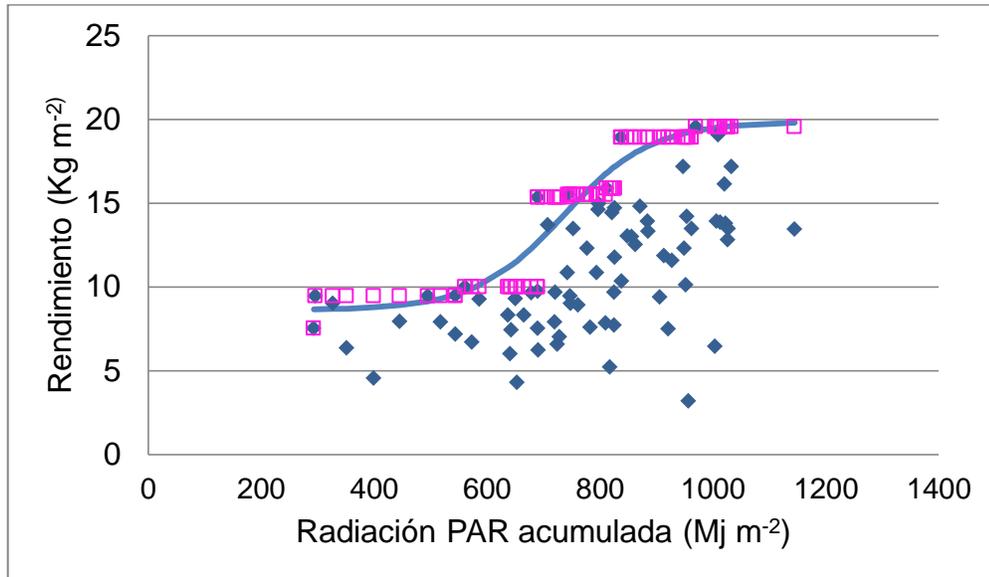
También ambas variables se correlacionaron positivamente con el largo de ciclo, destacándose la PAR acumulada con un coeficiente de correlación de 0,75 y un p -valor $<0,0001$. A partir de lo anterior, se concluye que para aumentar el rendimiento es importante incrementar la cantidad de PAR diaria incidente para lograr acumular mayor cantidad a lo largo del ciclo, esto depende de lo último, es decir en cultivos de mayor largo de ciclo la acumulación de radiación va a ser mayor. Pero además es importante incrementar la transmisividad del invernáculo prestando atención a el tipo de nylon (transparente, difuso, etc.), su estado (años de vida útil), las estructuras de madera y si colocan mallas sombras, doble techo o enalado. Ahora bien, también el estado del cultivo en términos de área foliar es relevante para interceptar la mayor cantidad de luz que contribuya a la fotosíntesis y con ello incrementar la fracción de luz interceptada. Asociado a esto último es relevante promover un rápido desarrollo inicial de la planta para lograr captar mejor la luz al comienzo. En relación a la ubicación del ciclo en el año depende principalmente de los intereses comerciales y la estrategia productiva del productor, que van a determinar la cantidad de radiación incidente. Existen

varios reportes que señalan la relación entre la cantidad de área foliar y la estructura y tipo de nylon en los invernaderos con la cantidad de radiación interceptada por los cultivos (Castilla 1995, Gijzen 1995, Heuvelink y Dorais 2005a).

El rendimiento promedio para ambas zafas fue de 11 Kg/m² independientemente del tipo de ciclo, y observando la figura 37 para lograr y poder superar ese valor la PAR acumulada en el ciclo debe superar los 600 Mj/m². Se observa tanto en la figura 37 y 38, que en la medida que se acumule mayor radiación en el ciclo el rendimiento se incrementa, hasta llegar a un nivel de saturación con valores cercanos a 1000 Mj/m² donde el rendimiento se acerca a los 20 Kg/m².

Se observó gran variabilidad de rendimiento para un mismo valor de radiación interceptada independientemente del tipo de ciclo, donde por ejemplo a niveles de radiación acumulada cercanos a 1000 Mj/m² hay cultivos que rinden 20 kg/m² y otros que levemente superan los 5 kg/m².

Para explicar estas diferencias se debe pensar en analizar los factores limitantes y reductores del rendimiento. Berrueta¹ en el trabajo realizado en tomate bajo invernáculo en el sur del país separó en grupos de bajo, medio y alto nivel de irradiancia para explicar estas diferencias de rendimiento dentro de un mismo grupo. La cantidad de potasio aplicado, la cantidad de potasio en hoja a inicio de cosecha y la cantidad de potasio aplicado en fertiriego fueron las variables que explicaron las diferencias en los grupos de baja, media y alta radiación respectivamente en esa investigación en el sur del país.



Rendimiento real (♦), boundary points (□) y la línea boundary ajustada para los rendimientos máximos ($y_i = 11,24 / (1 + 11195,627 * \exp(-0,0127 * x_i)) + 8,622$).

Figura 37. Relación entre el rendimiento y la PAR interceptada acumulada para ambas zafras.

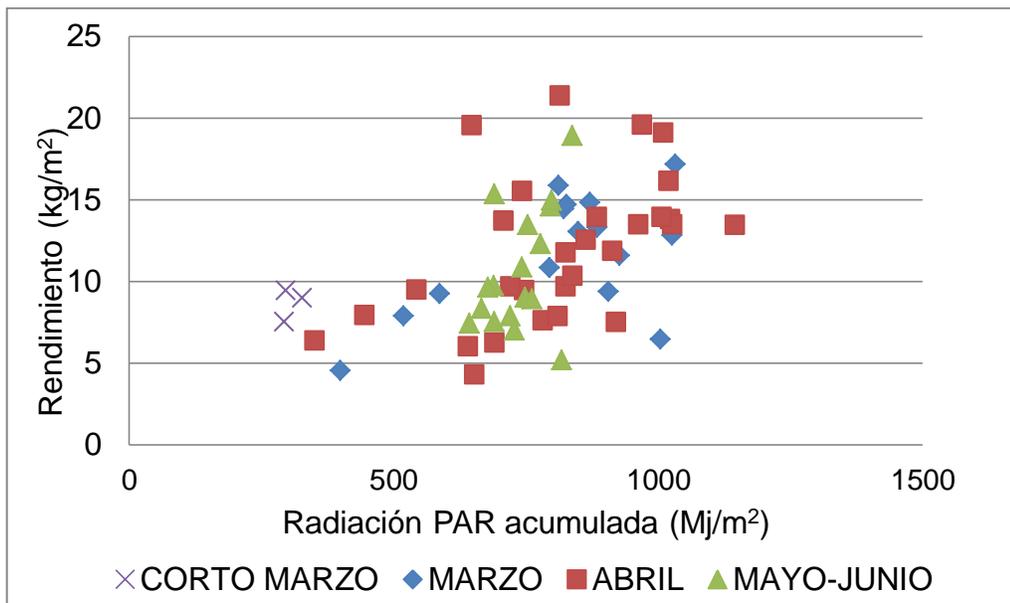


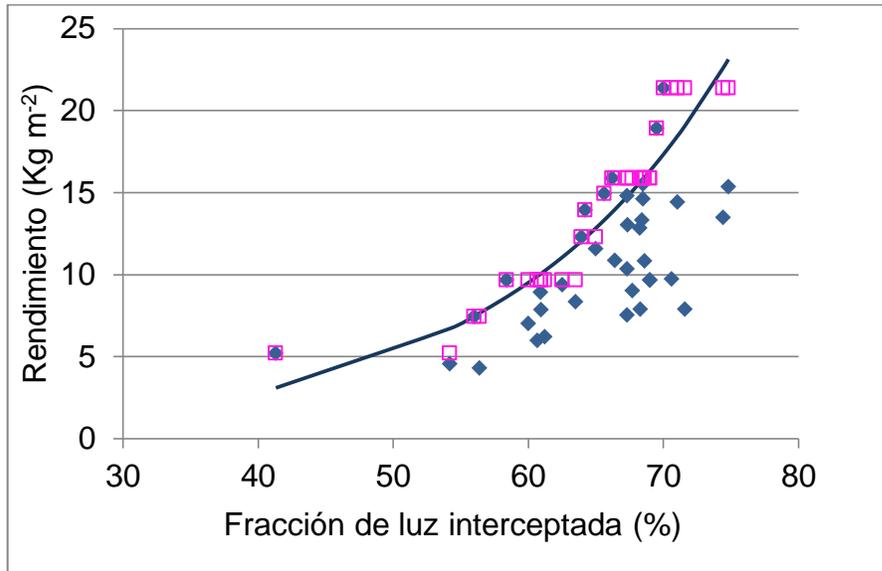
Figura 38. Rendimiento en función de la PAR interceptada acumulada según el tipo de ciclo.

En relación a la fracción de PAR interceptada la cual se relaciona positivamente con el rendimiento, se observaron diferencias entre las zafras analizadas como muestran las figuras 39 y 40. Además se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman para ambas zafras por separado, donde tanto el coeficiente como la significancia de la zafra 2016 (coeficiente=0,61; p-valor=<0,0001) fue superior a la 2017 (coeficiente=0,30; p-valor=0,0552).

En la zafra 2016 se ajustó una curva exponencial a los boundary points, donde en la medida que aumenta la cantidad de radiación interceptada por los cultivos el rendimiento se incrementa. Para lograr el rendimiento promedio de la zafra (11 kg/m²) la fracción de luz interceptada por el dosel en la hilera de plantas debió superar el 60% del total PAR. En la zafra 2017 se ajustó una curva logística, donde para superar el rendimiento promedio la fracción de luz interceptada debió superar el 55%.

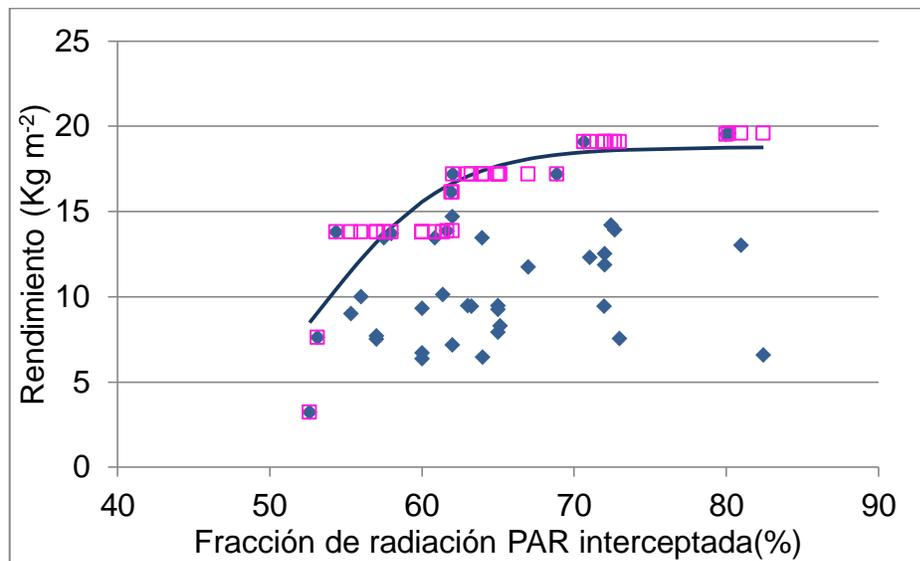
En ambas zafras se llegan a valores máximos cercanos a 20 Kg/m² con un 70% de radiación interceptada, aunque en el 2017 con valores cercanos al 60% se logran buenos rendimiento (superior a 15 kg/m²) mientras que a ese valor de intercepción en el 2016 no se logra llegar a 10 kg/m². Una posible explicación a este comportamiento diferencial entre zafras puede deberse a las diferencias de radiación entre años, donde en el 2016 gran parte del otoño hubieron registros menores de radiación, con excepción del mes de mayo donde la zafra 2017 tuvo los valores más bajos de radiación para ambas zafras. La cantidad de radiación incidente es una de las explicaciones de las variaciones de la fracción interceptada, y otra es la cantidad de área foliar la cual presenta gran variación durante el ciclo de cultivo.

A los efectos de analizar el comportamiento de esta variable es importante mencionar que la medición de la misma se realizó aproximadamente en cada cultivo dos meses antes de finalizar el ciclo. Por ello se debe relativizar el dato debido a que una sola medición en un momento preciso con determinada área foliar y estado de la misma no asegura que refleje el comportamiento anterior del cultivo. El hábito indeterminado del cultivo de tomate donde se mantienen de forma simultánea a lo largo de todo el ciclo el crecimiento de follaje y de los frutos, puede estar determinando el área foliar con la que llegó el cultivo al momento de la medición puntual (noviembre-diciembre).



Rendimiento real (♦), boundary points (□) y la línea boundary ajustada para los rendimientos máximos ($y_i = 0,26 * \exp(0,06 * x_i)$).

Figura 39. Relación entre el rendimiento y la fracción de PAR interceptada para la zafra 2016.



Rendimiento real (♦), boundary points (□) y la línea boundary ajustada para los rendimientos máximos ($y_i = 18,78 / (1 + 370260,38 * \exp(-0,24 * x_i))$).

Figura 40. Relación entre el rendimiento y la fracción de PAR interceptada para la zafra 2017.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo permitió determinar la magnitud de las brechas de rendimiento existentes en la producción de tomate bajo invernáculo en Salto, la variabilidad de rendimientos entre sitios evaluados y jerarquizar que factores la determinaron. Se registró gran variación en los rendimientos obtenidos entre productores (coeficiente de variación promedio entre zafras: 36%) y una importante brecha de rendimiento (promedio dos zafras: 28%).

Las variaciones en el rendimiento fueron determinadas en mayor medida por el número de frutos por m^2 , aunque también el tamaño de fruto tuvo efecto significativo sobre el rendimiento. No se observó correlación negativa significativa entre estos dos factores. Por lo tanto, existe margen para aumentar el rendimiento incrementando el número de frutos por m^2 sin reducir el tamaño.

La variación en número de frutos por m^2 fue explicada principalmente por el número de frutos por planta, pero también en forma importante por la densidad final de plantas. Tanto el número de racimos por planta como el número de frutos por racimo fueron importantes en explicar la variación en número de frutos por planta. El largo de ciclo es el factor fundamental que explica el número de racimos por planta y depende principalmente de la fecha de trasplante (tipo de ciclo) y de la decisión del productor de cuando terminar el cultivo entre fines de noviembre y fines de diciembre.

El número de flores por racimo así como el porcentaje de cuajado fueron igualmente importantes para explicar las variaciones en número de frutos por racimo. La variación en estos dos factores fue explicada por condiciones del ambiente que fueron diferentes en ambas zafras analizadas.

Entre 2 y 3 plantas por m^2 no habría correlación negativa entre frutos por planta y densidad, por lo que en muchos productores habría margen para aumentar el número de frutos por m^2 y el rendimiento, aumentando el número de plantas por m^2 . Los máximos rendimientos de cultivos con trasplante en marzo se obtuvieron con 2,5 plantas/ m^2 luego el rendimiento tendió a disminuir, mientras que los ciclos de abril y mayo alcanzaron los mayores rendimientos con 3 plantas/ m^2 . Este comportamiento respondería a las diferentes condiciones ambientales en cada ciclo, y se plantea como una estrategia con potencial de mejorar el rendimiento. La muerte de plantas fue en algunos casos un problema grave que redujo fuertemente el número final de plantas/ m^2 y por lo tanto el número de frutos por m^2 y el rendimiento.

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) acumulada a lo largo del ciclo presentó muy alta correlación con el rendimiento debido a que es una variable que integra otras variables con efecto significativo: largo de ciclo, PAR

incidente diaria, la fracción interceptada por el cultivo (que es un indicador del área foliar del cultivo) y la transmisividad de luz por la cubierta del invernáculo. Aumentar el % de transmisividad del invernáculo y la cantidad de área foliar del cultivo son posibles estrategias a tener en cuenta en el manejo con el fin de incrementar el rendimiento independientemente del tipo de ciclo.

En relación al tamaño de fruta no se encontraron factores que explicaran su variabilidad en forma consistente en ambas zafra. El tamaño de los frutos estuvo comprendido entre 60 y 80 mm independientemente del número de frutos por superficie y del largo del ciclo.

Existieron diferencias climáticas entre la zafra 2016 y 2017 en términos de temperatura, humedad relativa y radiación incidente. Se observaron relaciones significativas en muchos casos entre dichas condiciones ambientales con el rendimiento y con sus diferentes componentes.

La metodología de trabajo en base al diagnóstico agronómico regional y el análisis de brechas de rendimiento en predios de productores, permitió identificar los factores que inciden sobre el rendimiento en los diferentes sitios. Existe la necesidad en el futuro de continuar profundizando en el desarrollo de metodologías para este tipo de estudios, ya que resulta muy valiosa la información que deriva de ellas y podría servir como fundamento de nuevas líneas de trabajo en la investigación y la transferencia de tecnología.

Con el afán de brindar herramientas prácticas a los productores con el fin de reducir la brecha en los rendimientos, es importante continuar en esta línea de trabajo profundizando en los factores limitantes y reductores del rendimiento del cultivo de tomate.

6. RESUMEN

La producción de tomate bajo invernáculo en la zona de Salto presenta como muchos cultivos hortícolas en el Uruguay rendimientos significativamente inferiores al alcanzable y una gran variabilidad entre productores, lo cual afecta el resultado económico del cultivo y por ende los ingresos de las familias. El objetivo de este trabajo fue identificar, analizar y jerarquizar los principales factores determinantes del rendimiento que explican las brechas de rendimiento en el cultivo de tomate bajo invernáculo en la zona hortícola de Salto. La metodología de estudio fue el diagnóstico agronómico regional (DAR) sobre una muestra representativa de 79 cultivos de tomate bajo invernáculo en ambas zafra. Se registraron variables agroclimáticas, de manejo, de crecimiento y desarrollo del cultivo, y los componentes del rendimiento mediante observaciones directas realizadas durante visitas periódicas desde el trasplante hasta fin del ciclo de cada cultivo. Para el análisis de los resultados se realizaron análisis de sendero para cada zafra por separado y luego juntas mediante el procedimiento CALIS (SAS/STAT 9.2), gráficos de dispersión y boundary lines y análisis de correlaciones de Spearman. Ambas zafra se diferenciaron climáticamente, el 2016 presentó menor temperatura media y menores valores de radiación incidente en el otoño, el 2017 presentó mayor duración de ciclo con HR superiores al 80 % y registros de radiación superiores en la primavera. La brecha relativa de rendimiento promedio de ambas zafra fue 28%. El rendimiento se relacionó con mayor coeficiente de correlación con los frutos por m² y en menor medida pero también significativa con el tamaño de frutos, no hubo relación entre ambas variables. Para obtener un rendimiento superior a 11 kg/m² en ambas zafra el número de racimos cosechados por planta debió ser mayor a 8, la PAR acumulada interceptada mayor a 600 Mj/m² y la fracción de luz interceptada mayor a 60%. Todas las densidades de plantas permitieron alcanzar el rendimiento promedio, sin embargo, solamente los cultivos con 3 plantas/m² obtuvieron 20 Kg/m². Solo los cultivos con al menos 10 racimos por planta, 55% cuajado, 1000 Mj/m² de PAR acumulado y 70% de fracción de luz interceptada lograron rendimientos superiores a 20 kg/m².

Palabras clave: Brechas de rendimiento; Diagnóstico agronómico regional; Análisis de sendero.

7. SUMMARY

The production of tomato under greenhouse in the Salto area presents, as many horticultural crops in Uruguay, yields significantly lower than the attainable and a great variability among producers, which affects the economic result of the crop and therefore the income of the families. The objective of this study was to identify, analyse and prioritize the main determinants of performance that explain the yield gaps in the cultivation of tomatoes under greenhouse in the horticultural zone of Salto. The study methodology was the regional agronomic diagnosis (DAR) on a representative sample of 79 tomato crops under greenhouse in both harvests. Agroclimatic variables, management, growth and development of the crop, and yield components were recorded through direct observations made during periodic visits from the transplant to the end of the cycle of each crop. For the analysis of the results were conducted analyses of the path for each harvest separately and then together through the procedure CALIS (SAS/STAT 9.2), scatter graphics and boundary lines and analysis of correlations Spearman. Both harvests were climatically differentiated, 2016 presented lower average temperature and lower incident radiation values in the autumn, 2017 showed a higher cycle duration with HR than 80% and higher radiation records in the spring. The relative gap of average yield of both harvests was 28%. The yield was related to a higher correlation coefficient with the fruits per m² and to a lesser extent but also significant by the fruit size, there was no relationship between the two variables. To obtain a yield superior to 11 kg / m² in both harvests, the number of bunches harvested per plant should be greater than 8, the accumulated PAR intercepted greater than 600 Mj / m² and the intercepted light fraction greater than 60%. All plant densities allowed to achieve average yield, however, only crops with 3 plants/m² obtained 20 Kg/m². Only crops with at least 10 bunches per plant, 55% fruit set, 1000 Mj / m² of accumulated PAR and 70% of intercepted light fraction achieved yields higher than 20 kg / m².

Key word: Yield gaps; Regional agronomic diagnosis; Trail analysis.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Affholder, F.; Poeydebat, C.; Corbeels, M.; Scopel, E.; Tiftonell, P. 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research*. 143: 106 – 118.
2. _____; Tiftonell, P.; Corbeels, M.; Roux, S.; Motisi, N.; Tixier, P.; Wery, J. 2012. Modelling in Agronomy: what have we learned in the Last 15 Years?. *Agronomy Journal*. 104 (3): 735 - 748.
3. Aldabe, L. 2000. Tomate. *In: Producción de hortalizas frescas*. Montevideo, Uruguay, Epsilon. pp. 239-259.
4. Atherton, J. G.; Harris, G. P. 1986. Flowering. *In: Atherton, J.; Rudich, G. eds. The Tomato Crop: a Scientific Basis for Improvement*. New York, Chapman and Hall. pp. 167-194.
5. Aung, L. H. 1976. Effects of photoperiod and temperature on vegetative and reproductive responses of *Lycopersicum esculentum* Mill. *Journal of Horticultural Science*. 101 (4): 358-360.
6. Bakker, J. C. 1990. Efecto de la humedad en el día y la noche en el rendimiento y calidad de fruta en invernaderos de tomate. *Journal of Horticultural Science*. 65: 323-331.
7. Berrueta, C.; Dogliotti, S.; Franco, J. 2012. Análisis y jerarquización de factores determinantes del rendimiento de tomate para industria en Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 16 (2): 39 - 48.
8. Bordenave, F. G.; Barros, C.; Vicente, E.; Dogliotti, S. 2012. Descripción y análisis de la tecnología de producción de frutilla (*Fragaria x ananassa* Duch.) en la zona de Salto y su efecto sobre los resultados físicos y económicos. *In: Día de Campo: cultivares de Frutilla en el Litoral Norte (2012, Salto)*. Resúmenes. Montevideo, INIA. p. 9 (Actividades de Difusión no. 691).
9. _____. 2013. Descripción y análisis de la tecnología de producción de frutilla (*Fragaria x ananassa* Duch.) en la zona de Salto y su efecto sobre los resultados físicos y económicos. Tesis Ing. Ag. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 87 p.

10. CAAM (Comisión Administradora del Mercado Modelo. Área Producción y Comercialización, UY). 2016. Anuario estadístico 2016. (en línea). Montevideo. 24 p. Consultado abr. 2018. Disponible en http://www.mercadomodelo.net/c/document_library/get_file?uuid=f8f30547-64b2-4e1f-9739-b585a16dd6d9&groupId=42766
11. _____. 2017. Situación y perspectivas de productos hortícolas en el departamento de Salto, Uruguay. (en línea). Montevideo. 8 p. Consultado nov. 2017. Disponible en http://www.mercadomodelo.net/c/document_library/get_file?uuid=3d9f593b-569d-44df-8e62-f3a6f9dd9b29&groupId=42766
12. Calvert, A. 1959. Effect of the air environment on development of flowering in tomato: light and temperature interactions. *Journal of Horticultural Science*. 34 (3): 154-162.
13. _____. 1964. The effect of air temperature in growth of young tomato plants in natural light conditions. *Journal of Horticultural Science*. 34: 154-162.
14. _____. 1973. Environmental responses. *In*: Kingham, H. G. ed. *Tomato manual*. London, Grower Books. pp. 23-24.
15. Castilla, N. 1995. Manejo del cultivo intensivo con suelo. *In*: Nuez, F. ed. *El cultivo de tomate*. Madrid, Mundi-Prensa. pp. 190-225.
16. Chamorro, J. 1995. Anatomía y fisiología de la planta. *In*: Nuez, F. *El cultivo de tomate*. Madrid, Mundi-Prensa. pp. 45-91.
17. Cockshull, K. E. 1988. The integration of plant physiology with physical changes. *Acta Horticulturae*. no. 229: 113-123.
18. _____.; Graves, C. J.; Cave, C. R. J. 1992. The influence of shading on yield. *Journal of Horticultural Science*. 67 (1): 11-24.
19. Dal Pozzo, A. 2017. Tomato plant illustration. (en línea). Mehmetcetinsozler.com. Consultado dic. 2017. Disponible en <http://www.mehmetcetinsozler.com/1e689fb119fbfd02-tomato-plant-illustration-adam-dal-pozzo-creative-direction.html>
20. David, C.; Jeuffroy, M. H.; Henning, J.; Meynard, J. 2005. Yield variation in organic winter wheat a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy Sustainable Development*. 25: 213–223.
21. De Koning A. N. M. 1989. The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomatoes. *Acta Horticulturae*. no. 248: 329-336.

22. _____. 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato a quantitative approach. Naaldwijk, The Netherlands. Agricultural University Wageningen. 240 p.
23. de Ponti, T.; Rijk, B.; van Ittersum, M. K. 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agricultural Systems*. 108: 1-9.
24. Delmotte, S.; Tittonell, P.; Mouret, J. C.; Hammond, R.; Lopez-Ridaura, S. 2011. On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between. *European Journal of Agronomy*. 35: 223-236.
25. Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; Gonzáles, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2015. InfoStat versión 2017. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. FCA. s.p. Consultado feb. 2018. Disponible en <http://www.infostat.com.ar/>
26. Dogliotti, S.; Abedala, C.; Aguerre, V.; Albín, A.; Alliaume, F.; Álvarez, J.; Bacigalupe, G.F.; Barreto, M.; Chiappe, M.; Corral, J.; Dieste, J.P.; García de Souza, M.C.; Guerra, S.; Leoni, C.; Malán, I.; Mancassola, V.; Pedemonte, A.; Peluffo, S.; Pombo, C.; Salvo, G.; Scarlato, M. 2010. Desarrollo sostenible de sistemas de producción hortícolas y hortícola-ganaderos familiares: una experiencia de co-innovación. Montevideo, INIA. 112 p. (FPTA no. 33).
27. _____.; Colnago, P.; Galván, G.; Aldabe, L. 2011. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos hortícolas: tomate (*Lycopersicon esculentum*), papa (*Solanum tuberosum*) y cebolla (*Allium cepa*). Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 85 p.
28. _____.; 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. Coinnovation of family farm systems: a systems approach to sustainable agriculture. *Agricultural Systems*. 126: 76 – 86.
29. _____. 1997 Influence of assimilates availability on fruit set and dry matter partitioning of sweet pepper: measurements and Simulation. Thesis MSc. Wageningen, The Netherlands. Wageningen Agricultural University. s.p.

30. Doré, T.; Sebillotte, M.; Meynard, J.M. 1997. A Diagnostic Method for Assessing Regional Variations in Crop Yield. *Agricultural Systems*. 54 (2): 169 – 188.
31. _____; Clermont-Dauphin, C.; Crozat, Y.; David, C.; Jeuffroy, M. H.; Loyce, C.; Makowski, D.; Malézieux, E.; Meynard, J. M.; Valantin-Morison, M. 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 28: 151– 161.
32. Ernst, O.; Kemanian, A. R.; Mazzilli, S.; Cadenazzi, M.; Dogliotti, S. 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crop Research*. 186: 107-116.
33. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2014. *Statistical yearbook*. (en línea). Rome. s.p. Consultado nov. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
34. Gijzen, H. 1995. Interaction between CO₂ uptake and water loss. In: Bakker, J. C.; Bot, G. P. A.; Challa, H.; van de Braak, N. J. eds. *Greenhouse Climate Control: an Integrated Approach*. Wageningen, Guéldria, The Netherlands, s.e. pp. 51–62.
35. Grange, R. L.; Hand, D. W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Journal of Horticultural Science*. 62: 125–134.
36. Hand, D. W. 1988. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. *Acta Horticulturae*. no. 229: 143-158.
37. Heiser, C.; Anderson, G. 1999. ‘New’ solanums. In: Janick, J. ed. *Perspectives on new crops and new uses*. Alexandria, Virginia, ASHS. pp. 379-384.
38. Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany*. 77: 71-80.
39. _____; Dorais, M. 2005a. Crop growth and yield. In: Heuvelink, E. ed. *Tomatoes*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University/CABI. pp. 85-144.
40. _____. 2005b. Developmental processes. In: Heuvelink, E. ed. *Tomatoes*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University/CABI. pp. 53-83.

41. _____.; Costa, J.M. 2005c. Introduction: the tomato crop and industry. In: Heuvelink, E. ed. Tomatoes. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University/CABI. pp. 1-19.
42. Hurd, R. G. 1973. Long-day effects on growth and flower initiation of tomato plants in low light. *Annals of Applied Biology*. 73:221-228.
43. Joel Huat, 2006. Facteurs limitatifs du rendement de la tomate industrielle en périmètres irrigués au Nord Sénégal. *Cahiers Agricultures*. 15 (3): 293-300.
44. Lammers, M. 2015. An analysis of yield gaps and their causes in greenhouse tomatoes in the South of Uruguay. Droevendaalsesteeg, The Netherlands, Wageningen University. 42 p.
45. Lobell, D. B.; Ortiz-Monasterio, J. I.; Asner, G. P.; Naylor, R. L.; Falcon, W. P. 2005. Combining field Surveys, Remote Sensing, and Regression Trees to Understand Yield Variations in an Irrigated Wheat Landscape. *Agronomy Journal*. 97: 241 - 249.
46. _____.; Cassman, K. G.; Field, C. B. 2009. Crop Yield Gaps: their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*. 34: 179-204.
47. _____. 2012. The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crop Research*. 143: 56-64.
48. Lovenstein, H.; Latinga, E. A.; Rabbinge, R.; van Keulen, H. 1993. Principles of theoretical production ecology. Wageningen, Guéldria, The Netherlands, Wageningen University. 117 p.
49. Marcelis, L. F. M. 1996. Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant. *Journal of Experimental Botany*. 47: 1281-1291.
50. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2008. Encuesta hortícola Sur y Norte. (en línea). Montevideo. 27 p. Consultado nov. 2017. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_horticola_sur_y_litoral_norte_-_ano_2008_-_julio_2009_-_no_277.pdf
51. _____. _____. 2009. Encuesta hortícola Sur y Norte. (en línea). Montevideo. 30 p. Consultado nov. 2017. Disponible en

[http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2009 - zonas sur y litoral norte - junio 2010 - no 290.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2009_-_zonas_sur_y_litoral_norte_-_junio_2010_-_no_290.pdf)

52. _____. _____. 2011. Censo general agropecuario 2000. (en línea). Montevideo. 146 p. Consultado feb. 2016. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/censo2011.pdf>
53. _____. _____. 2012. Encuesta hortícola Sur y Norte. (en línea). Montevideo. 21 p. Consultado nov. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2012 - zonas sur y litoral norte no314.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2012_-_zonas_sur_y_litoral_norte_no314.pdf)
54. _____. _____. 2013. Encuesta hortícola Sur y Norte. (en línea). Montevideo. 23 p. Consultado nov. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2013 - zonas sur y litoral norte no 318.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2013_-_zonas_sur_y_litoral_norte_no_318.pdf)
55. _____. _____. 2014. Encuesta hortícola Sur y Norte. (en línea). Montevideo. 20 p. Consultado nov. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2014 - zonas sur y litoral norte.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuestas_horticolas_2014_-_zonas_sur_y_litoral_norte.pdf)
56. _____. _____. 2015. Encuesta hortícola Sur y Norte. (en línea). Montevideo. 18 p. Consultado nov. 2017. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/texto_publicacion_horticolas_2015.pdf
57. Milleville, P. 1993. La actividad de los agricultores: Un tema de investigación necesario para los agrónomos. *In*: Navarro Garza, H.; Colin, J. P.; Milleville, P. eds. Sistemas de producción y desarrollo agrícola. Francia, ORSTOM. pp. 37-41.
58. Peet, M. M.; Welles, G. 2005a. Greenhouse tomato production. *In*: Heuvelink, E. ed. Tomatoes. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University/CABI. pp. 257-304.
59. _____. 2005b. Irrigation and fertilization. *In*: Heuvelink, E. ed. Tomatoes. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University/CABI. pp. 171-198.
60. Picken, A. J. F.; Stewart, K.; Klapwijk, D. 1986. Germination and vegetative development. *In*: Atherton, J.; Rudich, G. eds. The Tomato Crop: a Scientific Basis for Improvement. New York, Chapman and Hall. pp. 111-157.

61. Salazar, R.; López, I.; Rojano, A.; Schmidt, U.; Dannehl, D. 2015. Tomato yield prediction in a semi-closed greenhouse. *Acta Horticulturae*. no. 1107: 263-270.
62. Saltveit, M. E. 1993. Internal carbon dioxide and ethylene levels in ripening tomato fruit attached to or detached from the plant. *Physiology Plantarum*. 89 (1): 204-210.
63. Scarlato, M. 2015. El cultivo de frutilla en el sur del Uruguay: principales variables que explican los resultados productivos. Tesis MSc. en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 136 p.
64. _____; Giménez, G.; Lenzi, A.; Borges, A.; Bentancur, O.; Dogliotti, S. 2017. Análisis y jerarquización de factores determinantes de las brechas de rendimiento del cultivo de frutilla en el sur del Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 21 (1): 43-57.
65. SAS Institute . 2009. SAS/STAT® 9.2. Users's Guide Release. (en línea). Cary, NC. s.p. Consultado feb. 2018. Disponible en <https://support.sas.com/en/support-home.html>
66. Scholberg, J.; McNeal, B.; Jones, J.; Boote, K.; Stanley, C.; Obreza, T. 2000. Field grown tomato: growth and canopy characteristics of field grown tomato. *Agronomy Journal*. 92: 152- 159.
67. Sims, W. L. 1980. History of tomato production for industry around the world. *Acta Horticulturae*. no.100: 25-26.
68. Speroni, G.; Bonifacino, M.; González, A.; Tardáguila, A.; Jolochin, G.; Arruabarrena, A.; Valtierra, V. 2010. Curso de botánica: descripciones de plantas agrícolas. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 221 p.
69. Suto, K.; Ando, T. 1975. Influence of atmospheric humidity and soil moisture contents on the plant water condition as well as on the growth of sweet pepper and tomato plants. *Bulletin of the Vegetable Ornamental Crops Research Station*. 2: 49–63.
70. 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. pp. 1-34.
71. Thompson, P. A. 1974. Characterisation of the germination response to temperature of vegetable seeds. *Scientia Horticulturae*. 2: 35-34.

72. Titttonell, P.; Shepherd, K. D.; Vanlauwe, B.; Giller, K. E. 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya: an application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 123: 137 - 150.
73. _____.; Giller, K. E. 2013. When yield gaps are poverty traps: the paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crop Research*. 143: 76-90.
74. van de Vooren, J.; Welles, G. W. H.; Hayman, G. 1986. Glasshouse crop production. In: Atherton, J.; Rudich, G. eds. *The Tomato Crop: a Scientific Basis for Improvement*. New York, Chapman and Hall. pp. 167-194.
75. van Ittersum, M.K.; Cassman, K.G.; Grassini, P.; Wolf, J.; Titttonell, P.; Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance. *Field Crops Research*. 143: 4-17.

9. ANEXOS

1. Coeficientes de correlación de Spearman y p-valor.

Variable (1)	Variable (2)	n	Spearman	p-valor
Periodo de cosecha	Largo ciclo	79	0,89	0,000
PAR diaria interceptada	Largo ciclo	79	0,23	0,041969
PAR diaria interceptada	Periodo de cosecha	79	0,33	0,003279
PAR interceptada acumulada	Largo ciclo	79	0,75	0,000
PAR interceptada acumulada	Periodo de cosecha	79	0,79	0,000
PAR interceptada acumulada	PAR diaria interceptada	79	0,77	0,000
T media	Largo ciclo	79	0,23	0,044959
T media	Periodo de cosecha	79	0,36	0,001028
T media	PAR diaria interceptada	79	0,57	0,000
T media	PAR interceptada acumulada	79	0,53	0,000
T mínima promedio	PAR diaria interceptada	79	0,29	0,009509
T mínima promedio	T media	79	0,52	0,000001
T máxima promedio	Largo ciclo	79	0,37	0,000843
T máxima promedio	Periodo de cosecha	79	0,33	0,002941
HR media	Periodo de cosecha	79	-0,23	0,044525
HR media	PAR diaria interceptada	79	-0,56	0,000
HR media	PAR acumulada	79	-0,47	0,000011
Racimos/pl	Largo ciclo	79	0,78	0,00000
Racimos/pl	Periodo de cosecha	79	0,77	0,00000
Racimos/pl	PAR diaria interceptada	79	0,23	0,041575
Racimos/pl	PAR acumulada	79	0,63	0,000
Racimos/pl	T máxima promedio	79	0,4	0,000281
Racimos/pl	HR media	79	-0,31	0,005361
Flores/racimo	T media	79	-0,29	0,008497
Flores/racimo	T mínima promedio	79	-0,59	0,0000
Flores/racimo	T máxima promedio	79	0,25	0,025905
Fruto/m2	Largo ciclo	79	0,57	0,0000
Fruto/m2	Periodo de cosecha	79	0,66	0,0000
Fruto/m2	PAR diaria interceptada	79	0,34	0,002829
Fruto/m2	PAR acumulada	79	0,6	0,0000
Fruto/m2	Densidad	79	0,4	0,000314
Fruto/m2	T media	79	0,3	0,006789
Fruto/m2	T máxima promedio	79	0,25	0,024112
Fruto/m2	HR media	79	-0,37	0,000709

Fruto/m2	Fracción luz	79	0,34	0,002377
Fruto/m2	Racimos/pl	79	0,69	0,000
Frutos/racimo	T mínima promedio	79	-0,41	0,00019
Frutos/racimo	Flores/racimo	79	0,66	0,000
Flores/pl	Largo ciclo	79	0,64	0,000
Flores/pl	Periodo de cosecha	79	0,54	0,000
Flores/pl	PAR acumulada	79	0,4	0,000307
Flores/pl	T mínima promedio	79	-0,4	0,000249
Flores/pl	T máxima promedio	79	0,48	0,000006
Flores/pl	Kg/m2	79	0,43	0,00008
Flores/pl	HR media	79	-0,28	0,011859
Flores/pl	Racimos/pl	79	0,84	0,000
Flores/pl	Flores/racimo	79	0,53	0,000001
Flores/pl	Fruto/m2	79	0,51	0,000001
Flores/pl	Frutos/racimo	79	0,33	0,002969
Tamaño promedio ponderado	Largo ciclo	79	-0,35	0,001446
Tamaño promedio ponderado	Periodo de cosecha	79	-0,25	0,029286
Tamaño promedio ponderado	Densidad	79	-0,28	0,012372
Tamaño promedio ponderado	Muerte plantas	79	-0,28	0,012825
Tamaño promedio ponderado	T mínima promedio	79	0,4	0,000275
Tamaño promedio ponderado	Racimos/pl	79	-0,24	0,036383
Tamaño promedio ponderado	Flores/racimo	79	-0,24	0,034431
Tamaño promedio ponderado	Flores/pl	79	-0,29	0,009381
Transmisibilidad	PAR diaria interceptada	79	0,42	0,000128
Transmisibilidad	PAR acumulada	79	0,26	0,022973
Transmisibilidad	Fracción luz	79	-0,24	0,031651
Frutos/pl	Largo ciclo	79	0,6	0,000
Frutos/pl	Periodo de cosecha	79	0,55	0,000
Frutos/pl	PAR acumulada	79	0,49	0,000005
Frutos/pl	T mínima promedio	79	-0,32	0,004667
Frutos/pl	T máxima promedio	79	0,43	0,000077
Frutos/pl	HR media	79	-0,4	0,00029
Frutos/pl	Racimos/pl	79	0,83	0,0000
Frutos/pl	Flores/racimo	79	0,39	0,000342
Frutos/pl	Fruto/m2	79	0,6	0,000
Frutos/pl	Frutos/racimo	79	0,53	0,000001
Frutos/pl	Flores/pl	79	0,89	0,000