



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA A LA
APLICACIÓN DE RIEGO DEFICITARIO
CONTROLADO EN CULTIVO DE PERA VARIEDAD
TRIUNFO DE VIENA (*Pyrus communis* L.)**

DIANA MILENA DIAZ ABRIL

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2015

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA A LA APLICACIÓN DE RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN CULTIVO DE PERA VARIEDAD TRIUNFO DE VIENA (*Pyrus communis* L.)

DIANA MILENA DIAZ ABRIL

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Agrícola

Director:

Ph.D. JAVIER ENRIQUE VÉLEZ SÁNCHEZ

Codirector:

Ph.D. PEDRO RODRIGUEZ HERNANDEZ

Línea de Investigación:

Adecuación de Tierras y manejo sostenible

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola

Bogotá, Colombia

2015

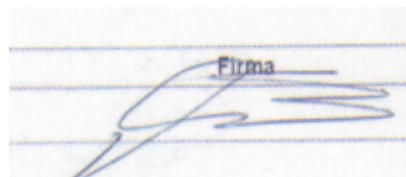
NOTA DE ACEPTACIÓN



DIRECTOR
Dr. JAVIER E. VÉLEZ S.



JURADO
Dr. ARTURO TORRECILLAS M.



JURADO
Dr. GERHARD FISCHER

Dedicado

A Dios,

Por darme la fortaleza para llegar a este punto.

A mi esposo,

Por su continuo apoyo y amor

A mis padres, familiares y amigos

Por creer en mí

*"Debemos usar sabiamente el tiempo y darnos cuenta de que siempre es el momento
oportuno para hacer las cosas bien"*

Nelson Mandela

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis:

- A mi director, Doctor. Javier Enrique Vélez por su apoyo incondicional, paciencia y enseñanzas durante la realización de este trabajo.
- A mi co-director, Doctor Pedro Rodríguez Hernández, por su constante apoyo, revisión y asesoría, compartiendo sus conocimientos libremente.
- A la I.Agr. María Jaqueline Molina Ochoa, por su apoyo y constante acompañamiento que fue de gran importancia para lograr los objetivos de este trabajo.
- A la Doctora, Zulma Natali Cruz Pérez, por compartir sus conocimientos, su colaboración y sus sabios consejos en este proceso.
- Al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba (INCA), por permitir enriquecer mis conocimientos en esta institución.
- A la Universidad Nacional de Colombia por la aceptación, apoyo y permitir enriquecer mis conocimientos para la realización de este trabajo

Resumen

El propósito de la investigación fue evaluar el efecto que tiene la aplicación del riego deficitario controlado (RDC) en la etapa de crecimiento rápido del fruto sobre la producción y calidad en un cultivo de pera variedad Triunfo de Viena (*Pyrus communis* L.) de 16 años de edad, sometidos a tres tratamientos de riego. Un control (T1) donde las plantas eran regadas al 100% del requerimiento hídrico, con el propósito de garantizar unas condiciones ideales y dos tratamientos deficitarios T2 y T3 regados al 73% y 53% del requerimiento hídrico respectivamente, en el periodo de crecimiento rápido del fruto en el año 2012 al 2013 en el municipio de Sesquilé, Cundinamarca. Durante la aplicación del RDC se monitoreo el estado hídrico del suelo (mediante lecturas de la humedad volumétrica (θ_v) y el potencial matricial del suelo (Ψ_s)), el estado hídrico de la planta (mediante medidas del potencial al tallo (Ψ_t) y los parámetros obtenidos de la construcción de curvas presión-volumen), cuajado, pérdida y crecimiento de frutos.

Los resultados obtenidos en cuanto a producción y parámetros de calidad como volumen, % de ácido málico (ATT), °Brix, índice de madurez (IM), firmeza del endocarpio y el mesocarpio, esfericidad y color del fruto no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos, mientras que en parámetros de calidad como peso medio y humedad del fruto presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) de T2 y T3 respecto a T1. Los árboles de pera (*Pyrus comunnis* L.) no realizaron ajustes osmóticos y elásticos, pero se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), lo que sugiere un mecanismo de adaptación que realiza la planta, mediante un cambio estructural de la pared celular. Mientras que la intensidad respiratoria y la producción de etileno se aceleraron en las plantas que se les disminuyó la lámina de riego durante el almacenamiento, lo que confirmó un comportamiento típico de las especies climáticas.

Respondiendo al objetivo principal de la tesis, se concluyó que la reducción de la lámina de riego hasta el 52,85% del requerimiento hídrico en la épocas de sequía, no se afecta la producción ni la calidad de la cosecha en el cultivo del pero, lo que permite ahorros del agua del 47,15% del agua a aplicar en esta etapa de crecimiento del fruto donde se requiere aplicación de riego.

Palabras clave: Hídrico, curva, mecanismos, cosecha, producción, calidad.

Abstract

The purpose of the investigation was to evaluate the effect of the application of deficit irrigation (RDI) on the stage of rapid fruit growth and quality of production in a crop pear cv Triumph Vienna (*Pyrus communis* L.) 16 years age, underwent three irrigation treatments. A (T1) Control where plants were being irrigated to 100% of water requirement in order to ensure ideal conditions and two deficit treatments T2 and T3 irrigated to 73% and 53% of water requirement respectively, in the period of rapid growth fruit in 2012 and 2013 in the municipality of Sesquilé, Cundinamarca. During the application of the DRC soil water status monitoring (by means of readings of the volumetric moisture (θ_v) and the soil matric potential (Ψ_s)), the water status of the plant (by measures to stem potential (Ψ_t) and the parameters obtained from the construction of pressure-volume curves), fruit setting, fruit growth and loss.

The results obtained in terms of production and quality parameters such as volume, % malic acid (TTA), ° Brix, maturity index (MI), firmness of endocarp and mesocarp, sphericity and fruit color showed no significant differences ($p > 0,05$) between treatments, while quality parameters as medium fruit and weight moisture showed significant differences ($p < 0,05$) in T2 and T3 compared to T1. Pear trees (*Pyrus communis* L.) did not perform osmotic and elastic adjustment, but significant differences ($p < 0,05$) in the relative apoplastic water content (CRAa) was found, suggesting an adaptation mechanism that performs the plant, through a structural change in the cell Wall. While the respiration rate and accelerated production of ethylene in plants that were decreased irrigation sheet during storage, which confirmed a typical climacteric behavior species.

Responding to the main objective of the thesis concluded that reducing irrigation depth to 52.85% of the water requirement in times of drought, production or quality of the crop in cultivation but does not affect allowing water savings of 47.15% water to apply at this stage of fruit growth where irrigation is required application.

Water, curve, mechanisms, crop production quality.

Contenido

	Pág.
1. Marco conceptual.....	5
1.1 El agua.....	5
1.2 Los frutales caducifolios	6
1.2.1 El peral	6
1.3 Estrés hídrico en las plantas	11
1.3.1 Efectos del estrés hídrico sobre el desarrollo vegetativo.....	12
1.3.2 Efectos del estrés hídrico en la producción y calidad de frutos	12
1.3.3 Mecanismos de resistencia al déficit hídrico en las plantas	13
1.4 Riego localizado	14
1.4.1 Ventajas y desventajas del sistema	14
1.4.2 Riego deficitario controlado (RDC).....	15
1.5 Requerimiento hídrico de los cultivos	15
1.5.1 Evapotranspiración	15
1.5.2 Condición hídrica del suelo	16
1.5.3 Condición hídrica de la planta.....	17
2. Materiales y métodos	19
2.1 Características del área de estudio	19
2.1.1 Localización.....	19
2.1.2 Material vegetal	19
2.1.3 Suelo	20
2.1.4 Clima	20
2.1.5 Riego	21
2.1.6 Diseño experimental	21
2.1.7 Manejo del riego	23
2.1.8 Prácticas culturales.....	23
2.2 Métodos y técnicas utilizadas.....	24
2.2.1 Balance hídrico	24
2.2.2 Condición hídrica del suelo	25
2.2.3 Condición hídrica de la Planta	26
2.2.4 Medidas de crecimiento de frutos	33
2.2.5 Determinación de la producción.....	35
2.2.6 Determinación de parámetros de calidad.....	35
2.2.7 Análisis Estadístico	40
3. Resultados y discusión	41
3.1 Variables climáticas.....	41
3.2 Volumen de agua aplicada	42

3.3	Relaciones hídricas.....	43
3.3.1	Condición hídrica del suelo.....	43
3.3.2	Condición hídrica de la planta	46
3.4	Cuajado y caída de frutos	51
3.5	Crecimiento de frutos	52
3.6	Producción y calidad	59
3.6.1	Producción	60
3.6.2	Parámetros de calidad de la fruta.....	61
3.6.3	Respiración de frutos.....	63
4.	Conclusiones y recomendaciones	67
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	68
5.	Bibliografía	71

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Curva simple sigmoidea de crecimiento de frutos de pepita en función de días después de plena floración, con las tres fases de crecimiento (Gil, 1991).	9
Figura 2-1 Cultivo de Pero (variedad Triunfo de Viena).	19
Figura 2-2 Plano general del lote con los 3 tratamientos, las 4 repeticiones (12 parcelas) y las unidades experimentales.	22
Figura 2-3 Contador volumétrico marca Contagua.	23
Figura 2-4 Tubo de acceso (A) para medida y sonda de perfil PR2 (B) de la humedad volumétrica del suelo.	25
Figura 2-5 Sensor de matriz granular (Watermark).	26
Figura 2-6 Cámara de presión de Sholander (Model 600 Pressure Chamber Instrument).	27
Figura 2-7 Hoja en bolsa de aluminio con cierre hermético.	28
Figura 2-8 Determinación de potencial hídrico de hojas saturadas (A) y de peso fresco (B).	29
Figura 2-9 Hojas durante proceso de deshidratación y medida del potencial hídrico en condiciones naturales.	29
Figura 2-10 Hojas congeladas por debajo de -50°C con nitrógeno líquido.	30
Figura 2-11 Obtención de potencial osmótico saturado, Centrifuga (A), obtención de jugo celular (B), osmómetro(C).	31
Figura 2-12 Isoterma presión volumen e indicadores.	32
Figura 2-13 Selección de flores estadio principal 5 (aparición del órgano floral), código 55 (Yemas florales, visibles (aún cerradas)) según escala BBCH.	33
Figura 2-14 Medición del crecimiento de los frutos, diámetro ecuatorial (A) y longitud (B).	34
Figura 2-15 Categorías de clasificación de acuerdo al diámetro.	35
Figura 2-16 Medición de color con el equipo Chromameter CR400 Konica Minolta.	36
Figura 2-17 Procedimiento para obtener el contenido de humedad, frutos cortados en horno (A) y peso seco (B).	37
Figura 2-18 Medición de respiración de frutos de pero con sensor de CO ₂ (Vernier).	38
Figura 2-19 Analizador de textura Brookfield Engineering Labs.	40

Figura 3-1 Temperatura media diaria (T_m), evapotranspiración potencial diaria (ET_o), precipitación diaria y déficit de presión de vapor diario (DPV) durante el periodo de investigación.	41
Figura 3-2 Balance hídrico cultivo de Pera (Variedad Triunfo de Viena) en Sesquilé, Cundinamarca.....	42
Figura 3-3 Volumen de agua aplicado en l árbol ⁻¹ , acumulado durante el periodo de riego deficitario para los tratamientos T1, T2 y T3.	43
Figura 3-4 Precipitación y potencial matricial del suelo (Ψ_s) a una profundidad de 0,6 m. Las barras indican el error estándar, letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), según la prueba de Duncan.	45
Figura 3-5 Precipitación, déficit de presión de vapor (DPV) y evolución del potencial al tallo (Ψ_t) en los tratamientos T1, T2 y T3 durante la restricción, los valores corresponden a la media de tres hojas por árbol en ocho árboles por tratamiento, las barras indican el error estándar.	47
Figura 3-6 Evolución diaria del potencial hídrico foliar (Ψ) en el tratamiento control (T1), bajo condiciones apropiadas de suministro hídrico, las barras indican el error estándar.	48
Figura 3-7 Isotermas presión – volumen, ecuaciones de ajuste y coeficiente de determinación para T1, T2 y T3.	49
Figura 3-8 Número promedio de flores (No. flores), número de frutos cuajados y número de frutos caídos.	52
Figura 3-9 Curvas de crecimiento del diámetro ecuatorial de los frutos con ajuste logístico de tres parámetros, las barras indican el error estándar.	53
Figura 3-10 Curvas de crecimiento en la longitud de los frutos con ajuste logístico de tres parámetros, las barras indican el error estándar.	55
Figura 3-11 Tasa absoluta de crecimiento (TAC) de diámetro ecuatorial (A) y longitud de frutos (B).	57
Figura 3-12 Tasa relativa de crecimiento (TRC) de diámetro ecuatorial (A) y longitud de frutos (B).	59
Figura 3-13 Porcentaje medio de calibres en frutos por tratamientos.	60
Figura 3-14 Relación del volumen y el diámetro ecuatorial del fruto, determinado en 72 frutos en los tratamientos T1, T2 y T3.	63
Figura 3-15 Emisión de CO_2 de fruta en los tres tratamientos.	64
Figura 3-16 Variación media de la IR en almacenamiento en los tres tratamientos.	65

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1 Codificación BBCH del estadio fenológico de aparición del órgano floral de los frutales de pepita (Meier <i>et al.</i> , 1994).	10
Tabla 2-1 Valores de variables climáticas de años 2012 y 2013; Temperatura máxima (Máx), mínima (Min) y media (Med); velocidad del viento (V. viento); humedad relativa media (Humedad relativa); precipitación total (Pt); Evapotranspiración potencial (ETo) y radiación solar.	20
Tabla 3-1 Humedad volumétrica media (θV) a una profundidad de 30 cm y porcentaje de reserva teórica del suelo.	44
Tabla 3-2 Efecto de la restricción en las hojas. Contenido hídrico foliar (CHf), potencial Osmótico saturado (Ψ_{os}), contenido relativo de agua en el punto de pérdida de turgencia (CRAppt), contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_{oppt}) y módulo de elasticidad máximo (ϵ_{max}), letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$), según prueba de Duncan.	50
Tabla 3-3 Ecuaciones del modelo logístico de crecimiento de diámetro ecuatorial del fruto.	53
Tabla 3-4 Ecuaciones del modelo logístico de crecimiento de longitud del fruto.	54
Tabla 3-5 Ecuaciones del modelo de la TAC de diámetro y longitud del fruto.	56
Tabla 3-6 Ecuaciones del modelo de la TAC de diámetro ecuatorial y longitud del fruto.	58
Tabla 3-7 Parámetros de producción de la fruta en los tratamientos T1, T2 y T3.	61
Tabla 3-8 Parámetros de calidad de la fruta.	62

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
CO ₂	Dióxido de Carbono	ppm
DPV	Déficit de presión de vapor	KPa
DDF	Días después de floración	días
HR	Humedad relativa	%
T	Temperatura	°C
CRA	Contenido relativo de agua	%
CRAa	Contenido relativo de agua apoplástica	%
CRAs	Contenido relativo de agua simplástica	%

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
Ψ	Potencial hídrico	MPa
Ψ_s	Potencial matricial del suelo	KPa
Ψ_t	Potencial al tallo	MPa
Ψ_{os}	Potencial osmótico saturado	MPa
Ψ_{oppt}	Potencial osmótico en punto de pérdida de turgencia	MPa
ϵ	Módulo de elasticidad	MPa
θ_v	Humedad volumétrica	%

Abreviaturas

Abreviatura	Término
RDC	Riego deficitario controlado
TAC	Tasa absoluta de crecimiento
TRC	Tasa relativa de crecimiento
ABA	Acido abscicico
EUAp	Eficiencia de uso de agua en la producción
ETc	Evapotranspiración de cultivo
ETo	Evapotranspiración potencial
PMP	Punto de marchitez permanente
CC	Capacidad de campo
IR	Intensidad respiratoria
ATT	Acidez total titulable
SST	Solidos solubles totales
IM	Indice de madurez

Introducción

La producción de pera en Colombia en el año 2013 fue de 22.953 toneladas en 1.714 ha, concentrada principalmente en el departamento de Boyacá; entre los años 2011 a 2013 el área cosechada, producción y rendimiento ha tenido un crecimiento anual de 21,1; 14,3; y 6,8% respectivamente (Agronet, 2013).

El preocupante problema de la extensa degradación y escasez cada vez más aguda de los suelos y el agua ponen en peligro a varios sistemas claves de producción de alimentos en todo el mundo, una conclusión inevitable es que hay que seguir intensificando la producción de alimentos para poder tener la seguridad alimentaria (FAO, 2011); lo que se busca es que los sistemas productivos actuales logren intensificar su capacidad productiva, teniendo un uso agrícola sostenible.

A nivel mundial la extracción de agua en el sector agrícola es de 70% (Kohli *et al.*, 2012), uno de los principales retos en la agricultura está relacionado con el cambio climático, por lo que existe la necesidad de realizar un uso más eficiente y sostenible del agua cuando hay necesidad de aplicar riego en época de verano.

Una de las estrategias para lograr una mayor eficiencia del recurso hídrico es la implementación del riego deficitario controlado (RDC) en cultivos (Vélez *et al.*, 2007b), el cual se define como la aplicación de agua por debajo de la necesidad hídrica en ciclos fenológicos determinados de baja sensibilidad al estrés hídrico, convirtiéndose en una alternativa para reducir el uso de este recurso (Lin *et al.*, 2014), sin presentar efectos negativos significativos en el rendimiento final (Pedrero *et al.*, 2010; Pedrero *et al.*, 2014).

Durante la aplicación de RDC se debe conocer las condiciones climáticas para determinar la demanda hídrica adecuada (Arévalo *et al.*, 2013), además del estado hídrico del suelo y de la planta durante su aplicación. Para conocer el contenido de agua en el suelo existen

mediciones directas, como la lectura del contenido volumétrico de agua mediante sondas de perfil y medidas indirectas, como el potencial matricial del suelo con sensores de matriz granular (Watermark). Para conocer el estado hídrico de la planta existen las medidas del potencial xilemático de la hoja y parámetros derivados de las curvas presión – volumen (Corcuera, 2002), cuya técnica brinda, una información completa sobre el estado hídrico de la hoja, permitiendo medir su contenido de agua simplástica y apoplástica, la turgencia y la elasticidad del tejido (Vila, 2011).

Las plantas adoptan mecanismos fisiológicos para enfrentar la sequía, que se basan principalmente en evitar, retrasar o tolerar el estrés hídrico (Cruz *et al.*, 2012) logrando adaptarse y sobrevivir. En la adaptación realiza cambios morfológicos como el cierre de estomas, área y orientación de hojas, en tolerancia puede realizar ajuste osmótico y cambios de las propiedades elásticas de los tejidos (Torrecillas, 1996).

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar el efecto que tiene la aplicación del riego deficitario controlado en la etapa de crecimiento rápido del fruto sobre la producción y calidad.

Como resultado de la investigación se espera determinar una lámina de riego que represente un ahorro de agua, como un aporte de mitigación al impacto ambiental sobre el recurso hídrico, sin afectar la producción y la calidad de la fruta. Por lo anterior, en esta investigación se consideran y conceptualizan los fundamentos básicos sobre los efectos del RDC en las condiciones hídricas foliares, cuajado y crecimiento de frutos, parámetros de la curva presión – volumen y propiedades físicas.

Objetivos

General

Evaluación de producción y calidad en Pera (Variedad Triunfo de Viena) con la aplicación de riego deficitario controlado en la etapa de crecimiento rápido del fruto.

Específicos

Determinar:

- Condiciones hídricas de la planta: potencial hídrico foliar
- Condiciones hídricas del suelo: potencial hídrico y humedad del suelo.
- Porcentaje de cuajado de frutos.
- Desarrollo y crecimiento de frutos.
- Propiedades físicas y químicas de los frutos.
- Evolución diaria del Potencial hídrico foliar.
- Punto de pérdida de turgencia a partir de la obtención de la curva Presión – Volumen.
- Posible lámina de riego que represente un ahorro de agua, sin afectar la producción y la calidad de la fruta.

1. Marco conceptual

1.1 El agua

El agua es fundamental para la vida, es el factor abiótico más importante de la tierra y uno de los principales constituyentes del medio en que vivimos y de la materia viva (Hernández, 2010). El agua es el compuesto más abundante en las células de las plantas, constituye alrededor del 85% de su biomasa y es fundamental para la mayoría de los procesos fisiológicos (FAO, 1999).

El agua cumple con tres funciones principales en las actividades fisiológicas de la planta, como constituyente, forma parte importante del protoplasma, así como de proteínas y lípidos. Una reducción del contenido de agua en las células, por debajo del nivel crítico ocasiona cambios en la estructura celular y finalmente la muerte; como solvente, permitiendo que gases, minerales y otros solutos se muevan entre células y órganos de la planta y como reactante o sustrato para muchos procesos importantes, como la fotosíntesis García *et al.*, 2001. Algunas plantas y órganos vegetales pueden soportar la deshidratación, pero a costa de disminuir su actividad metabólica (Vélez *et al.*, 2007b).

De toda el agua que existe en el mundo, tan solo el 3% es agua dulce y de esta, la agricultura consume cerca del 70%, esto sumado a la influencia del cambio climático, que, en ciertas áreas, modifica el régimen de lluvias, ya sea aumentándolo o disminuyéndolo, y a la gran presión que ejerce nuestra creciente población mundial, hace que sea imperativo buscar métodos para disminuir el consumo de agua en la agricultura, manteniendo o aumentando la producción por área de cultivo y además permitiendo obtener productos que logren satisfacer la demanda en cuanto a calidad que el consumidor le ha impuesto al mercado (Sánchez, 2013).

Teniendo en cuenta la gran importancia del agua en las plantas, se puede considerar que una cantidad limitada o excesiva de agua para éstas constituye un factor inductor de situaciones adversas o estresantes (Moreno, 2009).

1.2 Los frutales caducifolios

Los frutales caducifolios pertenecen a la familia de las Rosáceas y a la subfamilia Pomoidea. Su principal característica es que pierden las hojas en la época de invierno en las zonas templadas para resistir las bajas temperaturas. Su origen define la facilidad de adaptación a las condiciones tropicales, originarios de China (Miranda *et al.*, 2013).

Entre los frutales caducifolios se distinguen los frutales de pepita (pomáceas) y los frutales de hueso (drupáceas). Las pomáceas cultivadas más importantes son el manzano (*Malus domestica* Borkh.), el peral (*Pyrus communis* L.) y el membrillero (*Cydonia oblonga* Mill). De las drupáceas se destacan los durazneros (*Prunus pérsica* [L.] Batsch.) y los ciruelos (japonés: *Prunus salicina* Lindl.; europeo: *Prunus domestica* L.) (Miranda *et al.*, 2013).

Cabe destacar que no todas las especies caducifolias pierden sus hojas al mismo tiempo, ni siquiera la misma planta las perderá en la misma fecha año tras año, ya que la defoliación responde a las características climáticas de cada sitio y a las condiciones de cada año en particular (Arenas, 2011; Osorio y Gravina, 2008).

1.2.1 El peral

El origen de los perales cultivados en Europa se remonta, probablemente entre 1.000 y 2.000 años A.C. Se considera nativa de las regiones de Europa oriental y de Asia occidental, y se deriva al parecer, de la selección de razas silvestres de peral (*Pyrus communis*) hibridadas con otras especies europeas y asiáticas: *Pyrus nivalis*, *P. pyrifolia nakai* y *P. spinosa* (Alonso, 2011).

Es un árbol caducifolio de la familia de las Rosáceas, de tronco gris y corteza agrietada, alcanzan una altura aproximada entre 5 y 8 m y un diámetro de 0,3 a 0,5 m en la base, con una forma cilíndrica o piramidal bajo condiciones naturales. Como en la mayoría de los árboles, su altura es generalmente influenciada por la fertilidad del suelo, las prácticas culturales como la poda y el patrón (Ahmed, 2008; (Miranda *et al.*, 2013).

Las características morfológicas del fruto de pera son muy variables con la genética y el ambiente. El fruto es un pomo, piriforme, globoso u ovoide, con diámetro entre 2 y 12 cm y de 5 a 20 cm de longitud, con varias tonalidades entre verde/amarillo o rojo/café. La pulpa normalmente contiene tejidos endurecidos con células pétreas (Ahmed, 2008; Westwood, 1993). El fruto crece, igualmente como en la manzana, en forma sigmoidal simple (Jackson y Palmer, 1999; Miranda *et al.*, 2013).

▪ **Requerimientos edafoclimáticos**

El peral es característico de climas templados y algo húmedos, siendo más resistente al frío que al calor. Los veranos extremados desecan los frutos y les impiden crecer. Con altitudes entre 2000 y 2800 msnm, temperaturas que oscilen entre 12 y 16 °C y períodos de frío de 4 a 7 °C en la época de reposo. Adicionalmente requiere alta luminosidad, baja humedad relativa y precipitación anual media de 1000 mm (Parra y Hernández, 2000).

El peral requiere suelos profundos y fértiles, preferiblemente con textura media y pH entre 6,0 y 6,8, para que las raíces se desarrollen con facilidad en busca de agua y nutrientes (Arenas *et al.*, 2011) y concentraciones suficientes de N, P, Ca, Mg, B y Zn para lograr un adecuado desarrollo. El contenido de materia orgánica puede variar entre 2,8 y 5,0%; si el valor es menor, debe aplicarse abonos para suplir los requerimientos de la planta (Parra, 1997).

▪ **Plagas y enfermedades**

La enfermedad que se presenta con más frecuencia en los cultivos de pera es la sarna (*Venturia. pirina*) con 55% y causa en promedio 50% de daño económico. Se caracteriza por moteados de color verde oliva, de forma irregular, que posteriormente se tornan grisáceo-aterciopeladas en hojas, brotes y frutos (deformaciones y grietas), incluso en flores y ramas jóvenes. En el fruto, puede llegar a dar deformaciones y grietas. Otra enfermedad que se presenta es Pudrición (*Phytophthora* sp.) Fumagina (*Gloeodes pomigena* (Schwein.) Colby) con una incidencia del 26% la cual causa poco daño económico (3% en promedio), es una enfermedad que solo afecta en la calidad y el valor comercial de la fruta, y se distingue por presentar diminutas manchas negras agrupadas, dando la sensación de formar una mancha negruzca más o menos extendida, superficial y poco densa (Miranda *et al.*, 2013).

Entre las plagas que afectan el peral con mayor incidencia son los acaros con un 54%. En el peral también se reporta como ácaro la plaga *E. pyri*, la cual se conoce por su ataque que rodea la superficie del fruto con su telaraña ya que las hembras se alimentan y depositan los huevos cuando las yemas están en expansión. Áfidos (*A. citricola*) pulgones con un 15%, aunque se presentan, revisten menor importancia, basada en la frecuencia de presencia de estas plagas (Miranda *et al.*, 2013).

▪ Fenología

Aproximadamente 40 días antes de floración comienza el desarrollo fenológico. Los primeros 20 días consisten en fenómenos fisiológicos sin manifestación externa; posteriormente el desarrollo de las yemas se visualiza en función de sus cambios morfológicos y las temperaturas efectivas de crecimiento están por encima de los 7°C. Periodos frescos en esta etapa frenan el desarrollo y crecimiento de las yemas y retrasan el momento de plena floración.

La floración determina el inicio del crecimiento del fruto y condiciona el proceso hasta el momento de cosecha. Este periodo de crecimiento de fruto se ajusta a una curva de tipo sigmoideo y presenta tres fases bien definidas principales conocidas como: división celular, elongación celular y madurez; en cada una de ellas la temperatura ambiental regula los procesos fisiológicos. Se han registrado importantes aumentos en la tasa de división celular con temperaturas mayores a 12,5 °C (Rodríguez, 2009) (Figura 1-1).

En la fase I de multiplicación celular se alcanza aproximadamente cerca del número total de células que va a tener el fruto, pero con muy poco aumento de tamaño. La duración de este período es de aproximadamente 2 meses para pera (Sozzi, 2007). La fase II de elongación celular comienza una vez terminada la fase anterior. Consiste en la acumulación de agua y sustancias hidrocarbonadas en las células, originando el aumento de volumen y peso del fruto, hasta alcanzar casi el tamaño normal y característico. Es fundamental en esta etapa la capacidad fotosintética de la planta (relación hoja/fruto, cantidad de luz interceptada) determinada previamente por prácticas culturales (poda, raleo) y características propias del cultivar. Esta fase puede durar de 30 a 90 días. La última fase, que corresponde al proceso de maduración, suele durar de 10 a 30 días

desencadenando en el fruto una serie de transformaciones bioquímicas que conducen al desarrollo de las características organolépticas específicas del mismo (Kay, 1988; Barceló *et al.*, 1992).

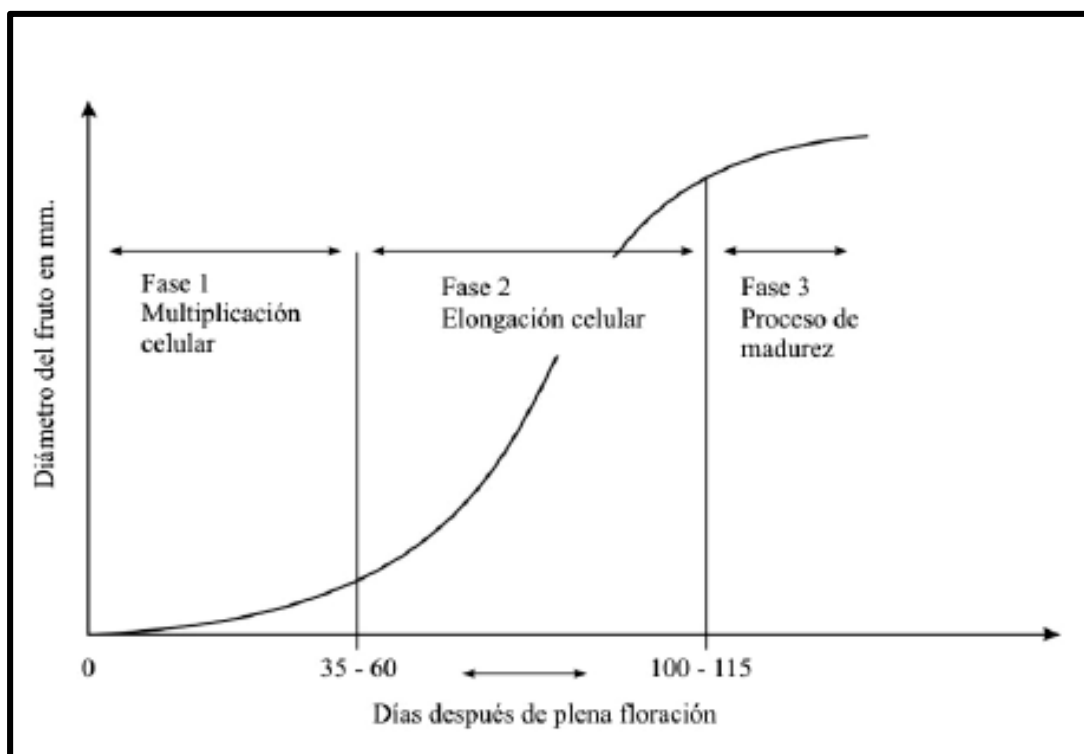


Figura 1-1 Curva simple sigmoidea de crecimiento de frutos de pepita en función de días después de plena floración, con las tres fases de crecimiento (Gil, 1991).

▪ Escala BBCH

La escala BBCH es un sistema para una codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de crecimiento para todas las especies de plantas mono y dicotiledóneas esta escala se basa en identificar con un código el desarrollo de las plantas con estadios principales y secundarios. En los estadios principales se encuentran: germinación o brotación, desarrollo de hojas, formación de brotes, crecimiento o desarrollo de brotes, desarrollo de partes vegetativas cosechables, emergencia de la inflorescencia, floración, desarrollo del fruto, coloración o maduración de frutos y semillas, la senescencia y comienzo de la dormancia (Bleiholder, 1996). Los estadios secundarios se numeran de 0 al 9, correspondiendo a valores porcentuales del desarrollo. En la Tabla 1-1 se puede

observar el estadio principal 5 apariciones del órgano floral y su correspondiente codificación de los estadios secundarios, para frutales de pepita

Tabla 1-1 Codificación BBCH del estadio fenológico de aparición del órgano floral de los frutales de pepita (Meier *et al.*, 1994).

Estadio principal 5. Aparición del órgano floral	
51	Las yemas se hinchan: escamas alargadas, con manchas ligeramente coloreadas.
52	Fin del hinchado de las yemas: escamas ligeramente coloreadas, visibles, con zonas cubiertas densamente de pelos.
53	Apertura de las yemas: las puntas verdes de las hojas, que aún encierran las flores, visibles.
54	Estadio oreja de ratón: Ápices foliares verdes 10 mm por encima de las escamas de las yemas; primeras hojas, separándose
55	Yemas florales, visibles (aún cerradas)
56	Estadio de yema verde: Flores simples separándose (aún cerradas)
57	Estadio de yema roja: pétalos florales, alargándose; sépalos, ligeramente abiertos; pétalos recién visibles
59	Estadio de balón: la mayoría de las flores, con pétalos formando una bola hueca

▪ **Análisis de crecimiento y desarrollo**

Las curvas de crecimiento en los vegetales son un reflejo del comportamiento de una planta en el ecosistema particular con respecto al tiempo. El crecimiento se puede referir a un incremento irreversible de materia seca o volumen, cambios en el tamaño, masa, forma o número de estructuras, como una función del genotipo y el ambiente, dando como resultado un aumento cuantitativo del tamaño y peso de la planta o de un órgano (Ardila *et al.*, 2011).

Las curvas de crecimiento del diámetro transversal en función del tiempo son las más empleadas (Casierra y Cardozo, 2007). Tienen la ventaja de ser de fácil determinación, no destructivas y permiten el seguimiento a lo largo del periodo de crecimiento. Las tasas de crecimiento más comúnmente utilizadas para el análisis son la tasa absoluta de crecimiento (TAC) que indica cambio de tamaño por unidad de tiempo y la tasa relativa de

crecimiento (TRC) que indica la variación de tamaño por unidad de tamaño inicial (Hunt, 2003).

1.3 Estrés hídrico en las plantas

El agua es la molécula esencial para la vida, en las plantas constituye del 80 al 95% de la masa de los tejidos en crecimiento y desempeña varias funciones únicas. Algunos de los procesos que son regulados por el volumen celular y la hidrodinámica incluyen, el crecimiento y proliferación, los cambios en la forma celular, la señalización de hormonas, el metabolismo y la obtención de nutrientes (Zonia y Munnik, 2007). Teniendo en cuenta la vital importancia del agua en las plantas, se puede considerar que una cantidad limitada o excesiva de agua para éstas constituye un factor inductor de estrés. Así el estrés hídrico o sequía se produce en las plantas en respuesta a un ambiente escaso en agua, en donde la tasa de transpiración excede a la toma de agua (Moreno, 2009).

Desde un punto de vista fisiológico la palabra estrés remite a algún tipo de sufrimiento, una alteración del funcionamiento normal con consecuencias sobre el crecimiento y desarrollo de la planta (Salisbury y Ross, 2000).

El déficit hídrico produce en las plantas un conjunto de respuestas que constituyen un cambio en su fisiología. También afecta la mayor parte de sus funciones vitales, de forma que no hay, prácticamente, ningún proceso fisiológico que no esté afectado por este.

La disminución del agua edáfica y/o el aumento de la demanda evaporativa de la atmósfera desencadenan una serie de eventos, que comienzan con la disminución del potencial hídrico (Ψ) que se transmite a todos los órganos de la planta causando una pérdida de turgencia celular (Ψ_p). Seguido a esto continua con una síntesis de ácido abscísico (ABA) y el bloqueo de la síntesis de citocininas en las raíces; y con un aumento en el pH de la savia xilemática (Vila, 2011), además de estos eventos se generan cambios como disminución de la expansión foliar, cierre estomático, peroxidación de lípidos, cambios en la permeabilidad de las membranas, degradación de proteínas y cambios en la expresión de genes (Moreno, 2009).

1.3.1 Efectos del estrés hídrico sobre el desarrollo vegetativo

El estrés hídrico es uno de los factores más limitantes del crecimiento, la composición y distribución de las especies. Afecta varios aspectos del funcionamiento de las plantas, desde el metabolismo celular (incluyendo la fotosíntesis) hasta el crecimiento. La fotosíntesis es el proceso fisiológico de mayor envergadura en el desempeño de las plantas (Donoso *et al.*, 2011).

Entre los principales efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento está la reducción en la altura, tallo, raíces, área foliar, peso foliar específico y biomasa de la planta (Luna *et al.*, 2012). Así mismo, la eficiencia de uso de agua en la productividad (EUAp) también es alterada debido a los cambios en la biomasa total y en la evapotranspiración (Turner, 1986).

Los largos períodos de sequía también pueden inducir modificaciones anatómicas en distintos niveles; por ejemplo, los cambios encontrados en la estructura del mesófilo en hojas de olivos y aguacates sometidos a estrés hídrico con consiguientes disminuciones en sus intercambios de gas, el inicio de condiciones de sequía modifica rápidamente relaciones de árbol-agua disminuyendo o deteniendo potenciales hídricos en hojas o tallo (Morandi *et al.*, 2014). Estos cambios pueden afectar a los gradientes de potencial de agua entre los diferentes órganos de los árboles con consecuencias en el xilema y el floema que fluye dentro del árbol. A nivel de hoja, ABA y otras moléculas se transportan desde las raíces como señales para reducir la conductancia estomática y evitar pérdidas de agua en hojas por transpiración excesiva (Morandi *et al.*, 2014).

1.3.2 Efectos del estrés hídrico en la producción y calidad de frutos

La calidad y rendimiento de un cultivo se relaciona directamente con la disponibilidad de agua, diferentes estudios en peral han encontrado que árboles que han estado bajo estrés hídrico prolongado suelen presentar frutos más pequeños, un menor rendimiento (Behboudian *et al.*, 1994; Naor *et al.*, 2001; Lopez *et al.*, 2011; Morandi *et al.*, 2014), y a veces características de mayor calidad como el contenido de sólido solubles totales y el

porcentaje de materia seca. Los cambios inducidos por la sequía en los flujos vasculares dentro del árbol también pueden afectar fácilmente el desarrollo del fruto.

Por otro lado otros investigadores han demostrado que el estrés hídrico mejora la calidad de la fruta en términos físicos y atributos químicos, que pueden mejorar el sabor y la calidad (Liu *et al.*, 2001; Verreyne *et al.*, 2001). El déficit hídrico durante el desarrollo del fruto o después de la cosecha reduce significativamente el crecimiento vegetativo, pero no afecta la producción de fruta (Ningbo *et al.*, 2008).

Lopez *et al.* (2011) encontraron al someter un cultivo de pera 'Conference' a déficit hídrico moderado, que la firmeza, acidez y concentración de sólidos solubles en la etapa de maduración del fruto fueron mayores y durante el almacenamiento se observó que la firmeza y acidez se mantuvo y la pérdida de peso se redujo.

1.3.3 Mecanismos de resistencia al déficit hídrico en las plantas

En las plantas existe una multiplicidad de mecanismos de resistencia a la sequía. A lo largo de la evolución, las plantas han desarrollado diferentes respuestas y adaptaciones que les permiten sobrevivir en condiciones de constante déficit hídrico (Moreno, 2009). Los mecanismos principales en los que se basan las plantas son: escape, evitación, retrasar o tolerar el estrés hídrico logrando adaptarse y sobrevivir (Cruz *et al.*, 2012).

En el mecanismo de escape la planta acorta el ciclo y lo restringe al periodo sin sequia entrando en un periodo de dormancia, adaptándose a periodos muy breves con humedad edáfica (Torrecillas, 2011).

Los mecanismos evitadores actúan sobre distintos puntos del sistema de transporte del agua en la planta y su acción física, facilitando la adquisición de agua o limitando su pérdida. Para evitar el estrés hídrico, los mecanismos evitadores minimizan la resistencia al flujo de agua en la planta, limitan la transpiración, o provocan la baja del potencial osmótico para favorecer el ingreso de agua al simplasto, además realiza cambios físicos como cierre estomático, aumento de la conductancia hidráulica, cambio de elasticidad del tejido, cambios morfológicos que disminuyen la radiación absorbida o minimizan la

transpiración (plegado de la hoja, el desarrollo de pelos y cutícula impermeable) (Vila, 2011).

Los mecanismos de tolerancia, son de tipo bioquímico y actúan a nivel celular, los tejidos sufren el estrés y desarrollan transformaciones morfológicas y bioquímicas para soportarlo. En las transformaciones morfológicas realiza una disminución de área foliar, plegado foliar o recubrimiento con antocianos, plegado de la pared celular y vacuolas de sostén celular. Mientras que en las químicas de disipa energía lumínica (ciclo de las xantofilas), síntesis de solutos compatibles, síntesis de antioxidantes y síntesis de enzimas antioxidantes (Vila, 2011).

1.4 Riego localizado

Su origen se remonta a finales de los años 30, generando un avance en tecnología de riego debido a la disminución de costos de producción de equipos. El riego localizado se define como la aplicación puntual de agua a las plantas en la zona de raíces, mediante dispositivos o emisores que la distribuyen a cada uno de los puntos que se desee irrigar (Vélez, 2005).

1.4.1 Ventajas y desventajas del sistema

Según SAGARPA (2014) las ventajas y desventajas del riego localizado son:

▪ Ventajas

- ✓ Ahorro de agua, minimiza pérdidas por conducción y aplicación.
- ✓ Disminución de la mano de obra necesaria para la explotación de los sistemas.
- ✓ Posibilidad de automatizar parcial o total el equipo, facilitando la operación.
- ✓ Aumento del rendimiento del cultivo por unidad de área.
- ✓ Permite fertilización junto al riego.
- ✓ Puede ser usado en topografía variada.
- ✓ Ahorro de energía en comparación con otros sistemas.

▪ Desventajas

- ✓ Necesidad de filtrar el agua para evitar taponamiento de emisores.

- ✓ Requiere manejo de personal calificado.
- ✓ Incremento de costos de inversión inicial en comparación a otros sistemas.
- ✓ Algunos de los elementos del sistema pueden ser susceptibles al ataque de los roedores.

1.4.2 Riego deficitario controlado (RDC)

El riego deficitario controlado (RDC) es una técnica de riego adelantada por Chalmers y Van Den (1975) en árboles de durazno, después el RDC se ha investigado y aplicado por muchos autores en diferentes árboles frutales (Yang *et al.*, 2013). En las últimas décadas el RDC se ha desarrollado para el control excesivo del crecimiento vegetativo o para el ahorro de agua, la técnica de RDC consiste en programar el riego con reducciones de la lámina en aquellos periodos en los que el crecimiento del fruto es menos sensible a las reducciones de agua (Marsal *et al.*, 2002) y cubrir las necesidades hídricas durante el resto del ciclo fenológico del árbol (Vélez *et al.*, 2011)

Estudios han encontrado que el RDC aumenta la floración y el número de fruta en árboles de pera. El déficit impuesto antes de la etapa de la ampliación de la fruta aumenta su rendimiento sin causar efectos negativos sobre su tamaño en comparación con un riego completo (Yang *et al.*, 2013). Además, parece que un nivel moderado de estrés de agua puede favorecer la diferenciación de brotes en las plantas leñosas (Marsal *et al.*, 2002).

1.5 Requerimiento hídrico de los cultivos

El requerimiento hídrico se refiere a la cantidad de agua que se debe aplicar para compensar el déficit de humedad del suelo y la demanda evaporativa durante el periodo vegetativo. Este requerimiento se determina por la evapotranspiración del cultivo menos el agua que aporta las precipitaciones, las aguas subterráneas, la acumulación en el suelo debido a anteriores precipitaciones o aportaciones de aguas superficiales o subterráneas (Arevalo *et al.*, 2013).

1.5.1 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra

parte mediante transpiración del cultivo (FAO, 2006). La ET_c , corresponde a la evaporación directa de la superficie del suelo (E), más la transpirada por la planta.

El conocimiento de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante el ciclo fenológico es importante para la programación del riego. Se estimada en la mayoría de los casos en función de las condiciones ambientales.

La mayor parte del agua consumida por la planta se evapora directamente a la atmósfera a través de los estomas de las hojas y tallos verdes en el proceso de transpiración (Arevalo *et al.*, 2013). En día de verano con una radiación típica de 320 a 380 cal cm⁻², la máxima evaporación diaria será aproximadamente de 6 mm (Vélez *et al.*, 2007a).

Entre los métodos indirectos más utilizados para calcular y estimar la ET_c se encuentran los estudios de la FAO N° 24 Requerimiento de los cultivos (Doorembos y Puit, 1975) y N° 56 Evapotranspiración de cultivos (Allen *et al.*, 1998).

En estos métodos la ET_o se puede calcular utilizando datos meteorológicos llamado el método de FAO Penman-Monteith, que requiere de información de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (FAO, 2006).

En los métodos directos se encuentra el balance de agua, donde la ET_c se calcula directamente realizando un balance de entradas y salidas de agua en un volumen de suelo y un tiempo determinado; el lisímetro de pesada, considerado como un método más preciso y directo para la medición de ET_c de un cultivo, basado en la ecuación de balance hídrico, que permite calcular el coeficiente de cultivo K_c mediante la relación ET_c/ET_o y por último los métodos térmicos, en los que se mide el flujo de la savia y el transporte de calor, usando el calor como trazador y aprovechando la capacidad calorífica de la savia en comparación al aire y la madera húmeda (Cohen *et al.*, 1996).

1.5.2 Condición hídrica del suelo

El interés de determinar el contenido de agua del suelo, radica en poder conocer su estado hídrico y evolución, monitoreando las respuestas a lluvias y riego. En el caso de contar con volúmenes deficitarios de agua es importante para la programación del riego conocer los efectos de la supresión o déficit hídrico en las etapas correspondientes al ciclo fisiológico

del cultivo, para decidir sobre la duración de la supresión y/o los volúmenes de agua que se deben aportar, pues dependiendo del momento, la duración y severidad de la supresión, se tendrán respuestas diferentes en cuanto al desarrollo vegetativo, producción y calidad de las cosechas (Vélez *et al.*, 2007a). Hasta el momento no se conoce exactamente en qué momento se puede hacer la supresión en el cultivo de pera sin afectar la producción y calidad de la fruta (Marsal *et al.*, 2012; Molina, 2014).

▪ **Medición del contenido de humedad del suelo**

Existen varios métodos para conocer y monitorear el contenido de humedad del suelo, están los sensores dieléctricos de tipo capacitivo: determinan la humedad del suelo (Θ_v) midiendo la constante dieléctrica de la matriz del suelo (ϵ), la variación corresponde al cambio en el contenido de agua del suelo. La sonda de neutrones: la aplicación de esta técnica para medir el agua en el suelo consta de tres pasos: i) emisión de neutrones rápidos desde una fuente radioactiva, ii) atenuación de la velocidad de los neutrones tras sucesivas colisiones con los átomos al punto de emisión y iii) recogida de los neutrones con velocidad atenuada por un detector cercano a la fuente. Por medio de impulsos eléctricos los neutrones captados por el detector se traducen en una lectura digital. Para convertir la lectura de la sonda de neutrones en humedad volumétrica, es necesario un modelo de calibración, donde la humedad volumétrica del suelo es el factor principal (Vélez *et al.*, 2007a). El tensiómetro: mide la tensión o potencial matricial (Ψ_m) que ejerce el suelo sobre el agua para ser retenida (indicada en centibares). Bloques de yeso: son sensores de resistencia eléctrica, constan de dos electrodos en un bloque cilíndrico de yeso que mide la resistencia eléctrica al paso de la corriente (Arenas, 2011) y por último los sensores de matriz granular: que operan con el mismo principio que un bloque de yeso, mide la resistencia eléctrica entre dos electrodos introducidos de un pequeño cilindro compuesto por material poroso. Sin embargo, el registrador viene calibrado para dar el valor en tensión de agua, mediante una ecuación que toma en cuenta la temperatura del suelo estimada o medida cerca del sensor (Vélez *et al.*, 2007b).

1.5.3 Condición hídrica de la planta

La condición hídrica en las plantas es un factor muy importante en su fisiología debido a la importancia del agua en todos los procesos bioquímicos y fisiológicos del crecimiento y

desarrollo (Ortiz, 2006). El estado de la planta refleja las condiciones del suelo y los efectos del clima, por lo que es conveniente utilizarla como guía (Cohen *et al.*, 2001 y Vélez *et al.*, 2007a).

▪ **Potencial hídrico Foliar**

El estrés hídrico de la planta puede ser monitoreado a través del potencial hídrico xilemático (Ψ) expresado en Mega pascales (MPa). Este refleja la tensión del agua en los vasos conductores de la planta definiendo el nivel de estrés en que se encuentra (Muñoz, 2005 y Arevalo *et al.*, 2013). El potencial hídrico se determina mediante instrumentos como el psicrómetro de termopares y la cámara de presión (Azcón-Bieto y Talon, 1993 y 2001). En 1965, Scholander *et al.*, desarrollaron una técnica para medir el potencial hídrico en unidades de presión. El método consiste en aplicar presión sobre una hoja cortada hasta que aparece el agua en el extremo seccionado del tallo o del pecíolo. Se interpreta que la presión positiva aplicada a la hoja corresponde a la presión negativa o tensión con la cual el agua estaba retenida en el interior del tallo antes de cortarse.

▪ **Curva presión volumen**

Una aplicación de gran importancia de la cámara de presión es el estudio de la tolerancia a la sequía o la eficiencia en el uso del agua por diferentes genotipos o especies. Esta técnica brinda una información completa sobre el estado hídrico de la hoja, permitiendo determinar un amplio espectro de parámetros hídricos en los tejidos: contenido hídrico total, relación peso turgente/peso seco, contenido relativo de agua (CRA), contenidos hídricos apoplástica y simplástica, presión osmótica a turgencia cero, contenido relativo de agua a turgencia cero, módulo de elasticidad promedio (Polanía *et al.*, 2003)

La técnica se basa en ir midiendo en diferentes tiempos el peso fresco y el Ψ de una hoja, mediante cámara de presión, a medida que ésta pierde agua por transpiración o por la presión de la misma cámara. Se comienza desde la hidratación máxima (turgencia máxima) y se llega por debajo del punto de marchitez, en un ciclo de desecación (Vila, 2011).

2. Materiales y métodos

2.1 Características del área de estudio

2.1.1 Localización

Este experimento se realizó entre el mes de Octubre de 2012 a Marzo de 2013 en la finca San Benito, vereda Boitivá, localizada en el municipio de Sesquilé, Cundinamarca, ubicado a 45 km de Bogotá D.C, con coordenadas latitud 5°02'53,65" N y 73°48'12,78"W con una altitud de 2.595 msnm y una temperatura media anual de 14°C. Esta zona se ubica dentro de tres cuencas, la del río Siecha, la del río Sisga y la alta del río Bogotá. La parcela de estudio tiene un área de 0,32 ha, con 17 filas de árboles de 10 árboles cada una.

2.1.2 Material vegetal

El estudio se desarrolló en un Cultivo de Peral (*Pyrus communis* L.) variedad Triunfo de Viena, plantado en el año 1998 en un marco de plantación de 4 x 4m (Figura 2-1).



Figura 2-1 Cultivo de Peral (variedad Triunfo de Viena).

2.1.3 Suelo

Los suelos en general son Histosoles, de textura franco arcillosa con un relieve montañoso de estructura erosional (IGAC, 2005).

El suelo en la parcela experimental tiene las siguientes características (Arenas *et al.*, 2012):

- Densidad aparente: 1,06 g cm⁻³
- pH promedio: 4,6
- Contenido de materia orgánica: 5,06%
- Capacidad de campo (CC): 26,9%
- Punto de marchitez permanente (PMP): 15,3%
- Potasio: 78,2 mg kg⁻¹
- Fosforo: 23,9 mg kg⁻¹

El agua utilizada para el riego presento un pH y conductividad eléctrica de 5,9 y 2 dS m⁻¹ respectivamente, a una temperatura de 20°C.

2.1.4 Clima

La información climática se obtuvo de la estación meteorológica WS-GP1 portátil (ATdelta-T Devices Ltda.) instalada al lado de la parcela experimental. El clima en la región es templado con lluvias moderadas todo el año, temperatura media de 14°C y precipitación de 890 a 1.500 mm al año, concentradas en los meses de abril a mayo y octubre a noviembre (Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Valores de variables climáticas de años 2012 y 2013; Temperatura máxima (Máx), mínima (Min) y media (Med); velocidad del viento (V. viento); humedad relativa media (Humedad relativa); precipitación total (Pt); Evapotranspiración potencial (ETo) y radiación solar.

Mes (año)	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	V. viento (m s ⁻¹)	Pt (mm día ⁻¹)		ETo (mm día ⁻¹)	Radiación (Wm ²)
	Máx	Min	Med			Total	Días		
Oct, 2012	24,20	4,40	12,82	82,10	0,79	85,40	21,00	2,66	168,07
Nov, 2012	23,60	4,70	13,57	78,49	0,85	56,40	10,00	3,00	169,81
Dic, 2012	25,40	3,80	12,56	76,97	0,99	18,40	9,00	3,16	185,43
Ene, 2013	25,30	3,00	13,37	73,97	1,03	1,60	4,00	3,26	206,11
Feb, 2013	24,80	5,50	12,82	78,14	0,95	34,00	9,00	3,09	135,52
Mar, 2013	24,70	4,10	13,57	79,87	0,96	58,40	16,00	2,99	164,72

2.1.5 Riego

Los árboles de Pera están regados desde su plantación con un equipo de riego por goteo que consta de:

- Filtro de discos 53 mm x 2".
- Válvulas de compuerta manuales (1"- 32 mm).
- Contador volumétrico de 13 mm en cada unidad experimental.
- Tubería principal y lateral en PVC de 1" y ¾" respectivamente.
- Línea de goteo de 16 mm (dos líneas por hilera de árboles).
- Gotero Turboline Agrifim 8 l h⁻¹ (6 goteros por árbol).

2.1.6 Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con tres tratamientos y cuatro repeticiones por tratamientos (12 parcelas) (Figura 2-2).

Se seleccionaron dos árboles al azar por cada lote, teniendo en cuenta el efecto de borde, sobre los cuales se determinó su estado hídrico foliar, porcentaje de cuajado de frutos y crecimiento de frutos, cada 15 días durante la temporada.

Se evaluaron tres láminas de riego, correspondientes al 100, 73 y 53% del requerimiento hídrico. La lámina de riego se determinó en base a la evapotranspiración de cultivo, ET_c calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith (FAO 56, 2006).

De noviembre 27 de 2012 a 22 de febrero de 2013, durante la etapa de crecimiento rápido del fruto, se aplicaron los siguientes tratamientos diferenciales:

- **Tratamiento control T1**, regado al 100% del requerimiento hídrico.
- **Tratamiento T2**, regado al 73,13% del requerimiento hídrico.
- **Tratamiento T3**, regado al 52,85% del requerimiento hídrico.

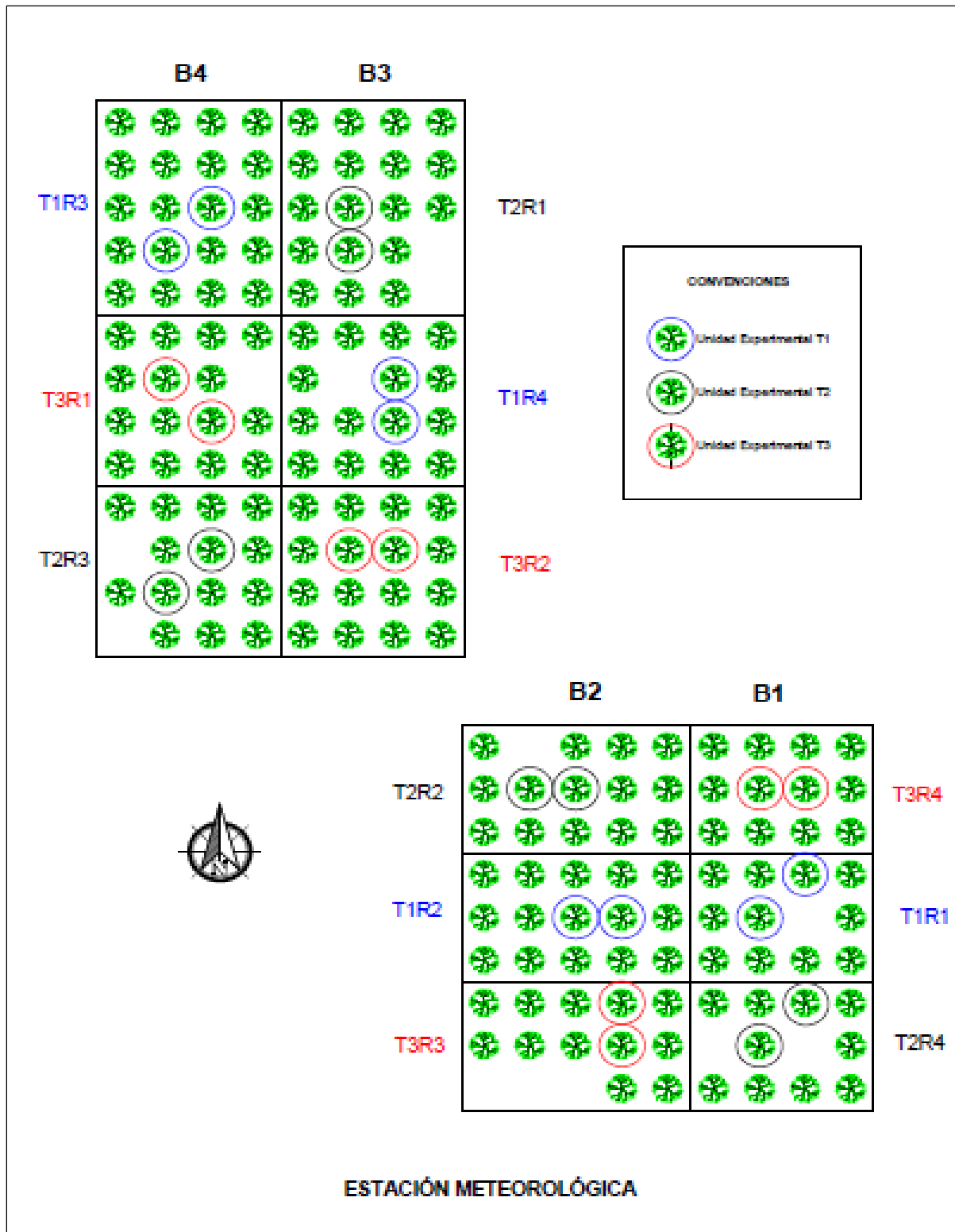


Figura 2-2 Plano general del lote con los 3 tratamientos, las 4 repeticiones (12 parcelas) y las unidades experimentales.

2.1.7 Manejo del riego

El agua aplicada se midió mediante contadores volumétricos marca Contagua, instalados en cada una de las parcelas experimentales (Figura 2-3). El volumen de agua de cada tratamiento se controló variando el tiempo de aplicación, calculado mediante la ecuación 2.1, la frecuencia de riego osciló entre dos y tres días por semana.

$$t_r = \frac{V_a}{Q_a} \quad (2.1)$$

Donde:

t_r = tiempo de riego (horas)

V_a = volumen a aplicar (litros planta⁻¹ día⁻¹)

Q_a = caudal aplicado (litros hora⁻¹ planta⁻¹)



Figura 2-3 Contador volumétrico marca Contagua.

2.1.8 Prácticas culturales

Durante el ciclo del cultivo se realizaron las siguientes labores:

- Fertilización inicial con aplicación edáfica de Nitrogeno (N), Potasio (P) y Fósforo (K).

- Control fitosanitario con rotación de aplicaciones de fungicidas e insecticidas cada 15 días.
- Aplicación de fertilizantes foliares cada 15 días en octubre y noviembre de 2012.
- Aplicación de una hormona fitorreguladora (Dormex) para potencializar y uniformar la floración.
- Control de malezas de forma manual manteniendo el plateo limpio.
- No se realizó poda durante el ciclo.

2.2 Métodos y técnicas utilizadas

2.2.1 Balance hídrico

El balance hídrico se determinó de acuerdo a los requerimientos hídricos del cultivo teniendo en cuenta la precipitación promedio mensual, precipitación efectiva, evapotranspiración potencial del cultivo y el coeficiente del cultivo (K_c).

▪ Evapotranspiración de cultivo

La evapotranspiración de cultivo (ET_c), se determinó mensualmente mediante el método FAO Penman-Monteith, (Ecuación 2.2) (FAO 56, 2006).

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (2.2)$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración de cultivo (mm día⁻¹).

ET_o = Evapotranspiración potencial (mm día⁻¹).

K_c = Coeficiente de cultivo (0,8).

▪ Volumen de agua aplicada

El cálculo del uso consuntivo del cultivo se realizó por periodos mensuales por cada tratamiento, realizando ajustes semanales de acuerdo al análisis de los parámetros climáticos (Ecuación 2.3).

$$U_c = \frac{ETc * \%A}{\eta} \quad (2.3)$$

Donde:

U_c = Uso consuntivo (mm día⁻¹)

ETc = Evapotranspiración de cultivo (mm día⁻¹)

$\%A$ = Porcentaje de área del cultivo (39%)

η = Eficiencia de sistema de riego (80%)

2.2.2 Condición hídrica del suelo

- **Humedad Volumétrica del suelo (θ_v)**

El contenido de humedad volumétrica del suelo (θ_v) se determinó por tratamiento a seis profundidades 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 y 1,0 metro semanalmente, mediante lectura con la sonda PR2 (Delta-T Devices Ltda) (Figura 2-4).



Figura 2-4 Tubo de acceso (A) para medida y sonda de perfil PR2 (B) de la humedad volumétrica del suelo.

- **Potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_s)**

El potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_s), se midió semanalmente con 10 sensores de matriz granular (Watermark Mod. 200ss Irrometer Co.) por tratamiento, instalados a 30 cm de profundidad, a una distancia de 26 cm del emisor y la línea de goteo (Figura 2-5).



Figura 2-5 Sensor de matriz granular (Watermark).

2.2.3 Condición hídrica de la Planta

- **Potencial hídrico al tallo (Ψ_t)**

Para conocer el potencial hídrico xilemático se utilizó la cámara de presión de Sholander (Model 600 Pressure Chamber Instrument), se midió el potencial al tallo (Ψ_t) al medio día cada 15 días, tres días después del riego o precipitaciones (Figura 2-6), siguiendo el procedimiento descrito por Scholander *et al.* (1965).

- Se realizó el corte del peciolo único y limpio de la hoja, minimizando el tiempo que transcurre del corte hasta la medición, para evitar pérdidas de agua.

- Se introdujo la hoja en la tapa de la cámara dejando la longitud mínima sobresaliente del peciolo para una buena lectura.
- Se realizó la inyección de gas en la cámara de forma lenta y regular para obtener equilibrio en las diferentes partes de la hoja.
- Se evitó que existieran perdidas de gas en la cámara para lograr una presión estable y una lectura confiable.

Durante estas mediciones se registró la temperatura y humedad relativa con un Datalogger EL-USB-2 y software EasyLog; para obtener la presión de vapor de saturación (PV_{sat}), Ecuación 2.4, presión de vapor de aire (PV_{aire}) Ecuación 2.5 y déficit de presión de vapor del aire (DPV) Ecuación 2.6.

$$PV_{sat} = 0.6108 * \exp \left[\frac{17.27 * T}{237.3 + T} \right] \quad (2.4)$$

$$PV_{aire} = \left(\frac{HR}{100} \right) * PV_{sat} \quad (2.5)$$

$$DPV = PV_{sat} - PV_{aire} \quad (2.6)$$



Figura 2-6 Cámara de presión de Sholander (Model 600 Pressure Chamber Instrument).

Para la medición de la variación del Ψ_t en los tres tratamientos, se seleccionaron tres hojas maduras por árbol en dos árboles por repetición, para un total de 24 hojas por tratamiento, ubicadas en la posición norte del árbol, embolsadas dos horas antes de la medición con bolsas de aluminio de cierre hermético para evitar su transpiración (Figura 2-7).



Figura 2-7 Hoja en bolsa de aluminio con cierre hermético.

Para la medición de la evolución diaria del potencial hídrico foliar se escogieron cuatro hojas en estado normal de transpiración por repetición para un total de 16 hojas en el tratamiento ETc 100%, comenzando la medición antes de la puesta de sol (4 am) y repitiendo cada dos horas hasta observar la recuperación del potencial en la planta (7 pm).

▪ **Curva Presión volumen**

La curva se obtuvo a mediados de la restricción hídrica. Se seleccionaron y cortaron 20 hojas totalmente desarrolladas por cada repetición e inmediatamente se hidrataron durante 24 horas en una cámara oscura con el propósito que se encuentren saturadas o a turgencia total en el momento de la medición.

Pasadas las 24 horas se determinó el potencial hídrico mediante la cámara de presión Sholander (Model 600 Pressure Chamber Instrument) y su peso fresco con balanza de precisión electrónica XT220A (precisión 0,001g) (Figura 2-8).

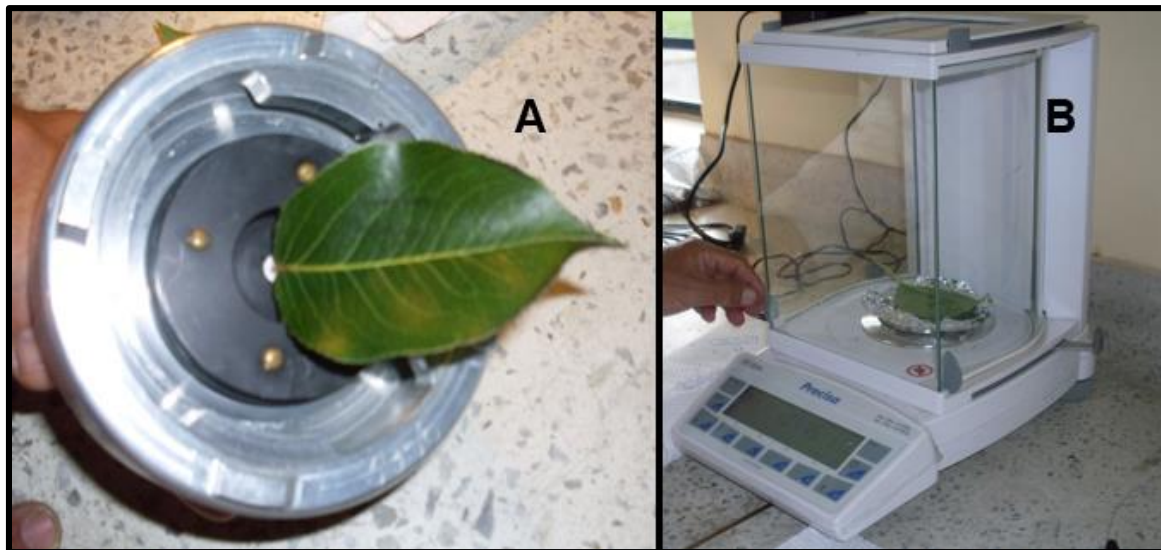


Figura 2-8 Determinación de potencial hídrico de hojas saturadas (A) y de peso fresco (B).

El anterior procedimiento se repitió sucesivamente durante la deshidratación del tejido en condiciones ambientales naturales (Figura 2-9), hasta que las variaciones en la pérdida de agua y del potencial fueron mínimas.

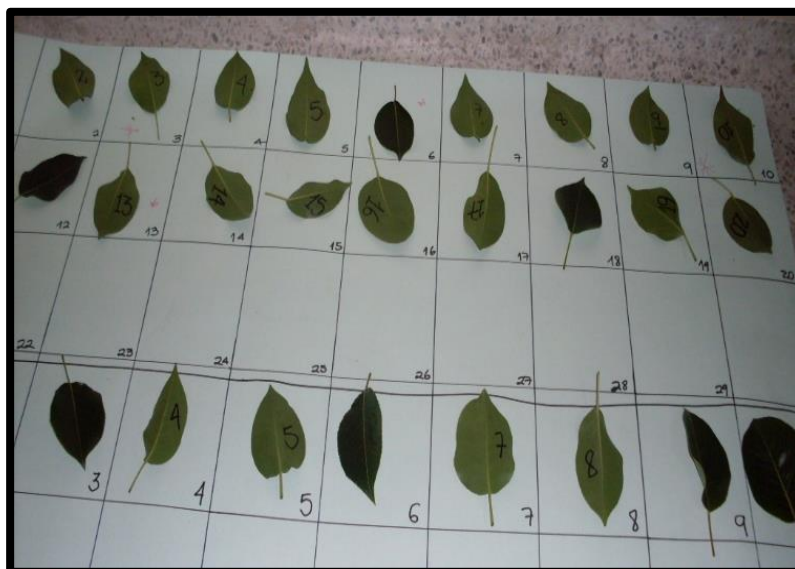


Figura 2-9 Hojas durante proceso de deshidratación y medida del potencial hídrico en condiciones naturales.

Al terminar este proceso las hojas se secaron en horno a 80°C por 48 horas para determinar su peso seco y finalmente se calculó el contenido relativo de agua (%CRA) (Ecuación 2.7) y el contenido hídrico total (%CH) (Ecuación 2.8).

$$CRA (\%) = \frac{Peso\ fresco - Peso\ seco}{Peso\ saturado - Peso\ seco} * 100 \quad (2.7)$$

$$CH (\%) = \frac{Peso\ saturado - Peso\ seco}{Peso\ saturado} * 100 \quad (2.8)$$

Para obtener el potencial osmótico foliar saturado (Ψ_{os}) se seleccionaron 4 hojas por repetición, se envolvieron en papel aluminio y se congelaron por debajo de -50°C con nitrógeno líquido (Figura 2-10), con el propósito de detener su actividad metabólica (Azcón-Bieto y Talon, 2001).

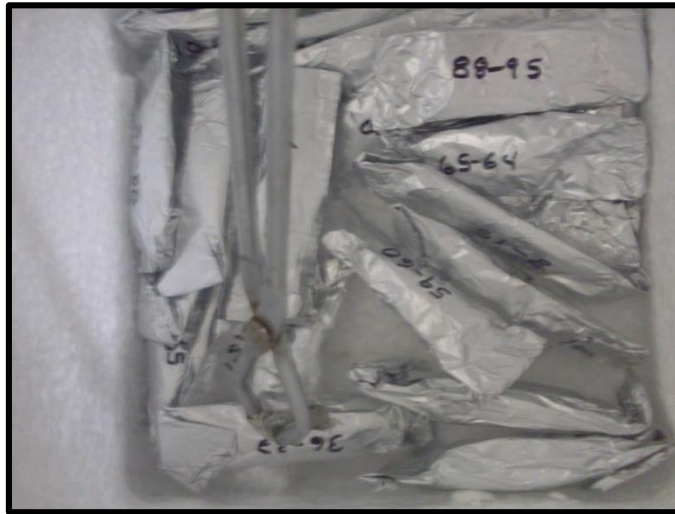


Figura 2-10 Hojas congeladas por debajo de -50°C con nitrógeno líquido.

Para la medición del Ψ_{os} las hojas se descongelaron y se centrifugaron en un equipo International equipment company durante 10 minutos a 10.000 rpm para obtener un jugo

celular al que se le determino el Ψ_{os} con un osmómetro de presión de vapor Wescor 5520 (Figura 2-11).



Figura 2-11 Obtención de potencial osmótico saturado, Centrifuga (A), obtención de jugo celular (B), osmómetro(C).

Se grafico el inverso del potencial de la hoja contra el contenido relativo de agua (CRA) y así tener las curvas presión – volumen por cada repetición de los tres tratamientos para cada momento evaluado (Figura 2-12).

Para ajustar la curva se uso la ecuación de la hiperbola modificada II (Ecuación 2.9).

$$f = \frac{x}{(a + b * x)} \quad (2.9)$$

Se trazo una línea recta partiendo del punto del $1/\Psi_{os}$ encontrado, interceptando la curva y extendiendo hasta llegar a un punto del eje %CRA donde el $1/\Psi_{os}$ sea cero (Rodríguez *et al.*, 2012), esto debido a que la dependencia del Ψ_{os} con el volumen celular es aproximadamente lineal (Azcón-Bieto y Talon, 2001), para poder determinar los siguientes parametros:

- ✓ **$1/\Psi_{o.p.t.}$ (MPa):** inverso del potencial osmotico en el punto de pérdida de turgencia en (MPa).
- ✓ **Contenido relativo de agua apoplástica, CRAa (%):** El CRAa se refiere al agua apoplastica que hace partes de los tejidos en (%). Se determina como el valor donde $1/\Psi$ es igual a 0 y la recta intercepta el eje de (%CRA).
- ✓ **Contenido relativo de agua simplástica, CRAs (%):** El CRAs se refiere al agua que se utiliza para el transporte en (%) y se determina como $100 - CRAa$.
- ✓ **Modulo de elasticidad, ϵ (MPa):** El modulo de elasticidad suministra una idea de la rigidez de las paredes celulares en cuanto mayor sea, mayor sera la resistencia de la pared celular a la deformación (Azcón-Bieto y Talon, 2001) y se determino de acuerdo a la (Ecuación 2.10) usada por Patakas (1999):

$$\epsilon(MPa) = \frac{(\psi_{os} - \psi_{sppt}) * (100 - CRAa)}{(100 - CRAppt)} \quad (2.10)$$

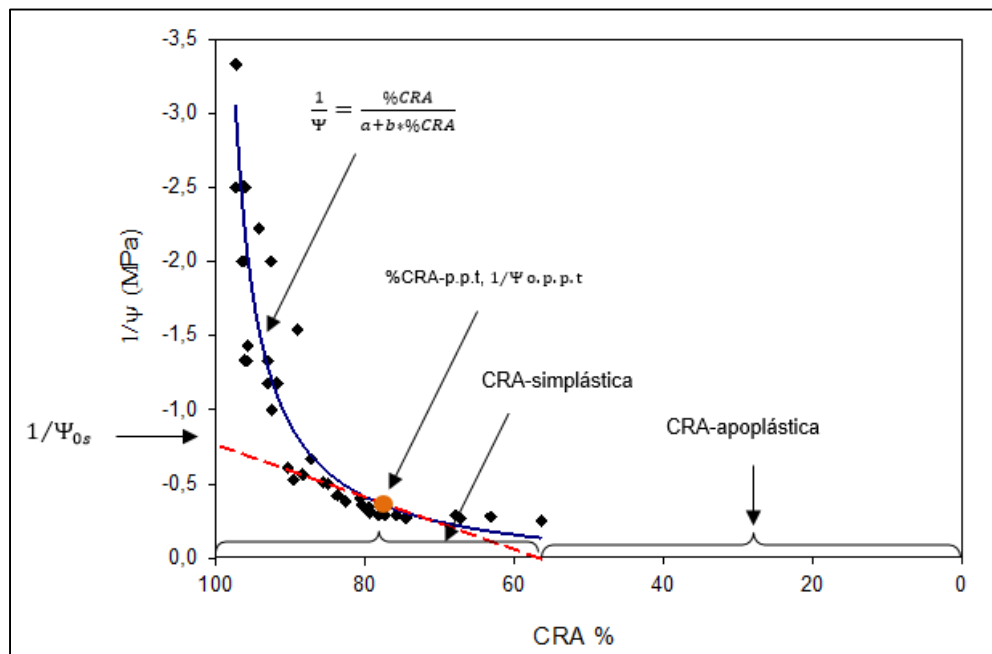


Figura 2-12 Isoterma presión volumen e indicadores.

▪ Medida de porcentaje de cuajado de frutos

Para conocer la influencia de la restricción de riego en el cuajado de frutos se hizo una evaluación cuantitativa (Garzón *et al.*, 2013). Como criterio de selección se tuvo en cuenta la escala BBCH (Bleiholder, 1996). Se eligió el estadio principal 5 (aparición del órgano floral), código 55 (Yemas florales, visibles (aún cerradas)) (Figura 2-13).



Figura 2-13 Selección de flores estadio principal 5 (aparición del órgano floral), código 55 (Yemas florales, visibles (aún cerradas)) según escala BBCH.

En el mes de noviembre se seleccionaron y marcaron dos ramas por punto cardinal (8 por árbol), en dos árboles por repetición para un total de 64 por tratamiento, realizando conteo de número de flores cada 15 días hasta la cosecha de los frutos.

2.2.4 Medidas de crecimiento de frutos

El tamaño del fruto es una de las características que se puede afectar con la restricción hídrica y a su vez definen calidad en pero (Parra *et al.*, 2008). En el mes de enero de 2013 se seleccionaron y marcaron 12 frutos por árbol, seis en la orientación norte y seis en la sur, con un tamaño inicial aproximado de 2,50 cm, en dos árboles por repetición para un total de 96 por tratamiento, a los que se les midió el diámetro ecuatorial y longitud (Figura 2-14), las medidas se realizaron cada 15 días hasta la cosecha, con un calibrador manual

(Discover, con una precisión de 0,05mm). Las curvas de crecimiento de diámetro ecuatorial y longitud de frutos, se ajustaron a una ecuación sigmoidea de tres parámetros.



Figura 2-14 Medición del crecimiento de los frutos, diámetro ecuatorial (A) y longitud (B).

▪ Tasa absoluta y relativa de crecimiento

La tasa absoluta de crecimiento TAC (Ecuación 2.11) representa un cambio de tamaño por unidad de tiempo y la tasa de crecimiento relativo TRC (Ecuación 2.12) expresa la tasa de variación del tamaño por unidad de tamaño inicial, calculadas con las ecuaciones de Hunt (1990).

$$TAC = \frac{\delta L}{\delta t} \quad (2.11)$$

$$TRC = \left(\frac{1}{L}\right) * \left(\frac{\delta L}{\delta t}\right) \quad (2.12)$$

Donde:

L = dimensión evaluada (cm)

$\delta L / \delta t$ = derivada de dimensión evaluada con respecto al tiempo (cm DDF⁻¹).

2.2.5 Determinación de la producción

La recolección de la cosecha se hizo de forma manual, realizando una clasificación en tres categorías de acuerdo al diámetro del fruto, categoría I con diámetros mayores a 68 mm, categoría II entre 62 y 68 mm y categoría III menores a 61 mm (Figura 2-15).



Figura 2-15 Categorías de clasificación de acuerdo al diámetro.

2.2.6 Determinación de parámetros de calidad

Para determinar los parámetros de calidad como dimensiones, peso, volumen, color contenido de agua, intensidad respiratoria, °Brix, acidez titulable, firmeza del endocarpio y pulpa, se seleccionaron seis (6) frutos por cada repetición para un total de 24 por tratamiento.

▪ Dimensiones, peso y volumen

A cada uno de los seis frutos se les midió; los diámetros ecuatoriales (a y b) y la longitud (Lo) con el calibrador manual (Discover) y el peso con balanza de precisión electrónica XT220A (Precisa con precisión de 0,001 g). La esfericidad se determinó de acuerdo a la ecuación de Mohsenin (1986).

$$E = \left(\frac{h * b}{a^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.13)$$

Donde,

E = Esfericidad

h = longitud de fruto (cm)

a = Diámetro ecuatorial mayor perpendicular a h , (cm)

b = Diámetro ecuatorial menor perpendicular a h , (cm)

El volumen se determinó mediante el volumen de agua destilada desplazada por el fruto en una probeta de 2000cm³.

▪ Color

El color se determinó por reflexión, utilizando el sistema de espacio de color CIE 1976 (L^* ; a^* ; b^*) o CIELAB. El eje L^* es el de luminosidad (lightness) y va de 0 (negro) a 100 (blanco). Los otros dos ejes de coordenadas son a^* y b^* , y representan variación entre rojizo-verdoso, y amarillento-azulado, respectivamente. Aquellos casos en los que $a^* = b^* = 0$ son acromáticos; por esa razón el eje L^* representa la escala acromática de grises que va de blanco al negro. Se realizaron tres mediciones del color en diferentes partes del fruto con un equipo Chromameter CR-400 Konica Minolta (Figura 2-16).



Figura 2-16 Medición de color con el equipo Chromameter CR400 Konica Minolta.

▪ Contenido de humedad en frutos

Para la determinación del contenido de humedad se cortaron los frutos con un espesor aproximado de 3 mm, se determinó el peso fresco (W_f) con la balanza de precisión electrónica XT220A (Precisa) y luego se sometieron a una temperatura de 105°C en el horno durante 72 horas e inmediatamente se pesaron para determinar su peso seco (W_s), obteniendo así el contenido de humedad promedio (CH) en cada tratamiento (Ecuación 2.14) (Figura 2-17).

$$CH(\%) = \left(\frac{W_f - W_s}{W_s} \right) * 100 \quad (2.14)$$



Figura 2-17 Procedimiento para obtener el contenido de humedad, frutos cortados en horno (A) y peso seco (B).

▪ Respiración de frutos

Para conocer la respiración de los frutos se utilizó el sensor de CO_2 (Vernier) (Figura 2-18) que mide los niveles de dióxido de carbono gaseoso controlando la cantidad de radiación infrarroja absorbida por las moléculas de dióxido de carbono en ppm, con la interfaz y el software LabQuest, se obtuvo lecturas cada 5 segundos hasta completar un tiempo de 900 segundos. Se utilizaron 4 frutos por cada repetición para un total de 16 frutos por tratamiento.



Figura 2-18 Medición de respiración de frutos de pera con sensor de CO₂ (Vernier).

▪ Intensidad respiratoria en almacenamiento

Se determinó la intensidad respiratoria en almacenamiento cada semana en los tres tratamientos, mediante montaje con el tubo de Petenkoffer, para la trampa para Dioxido de Carbono (CO₂) se usó hidróxido de potasio (KOH) al 10% y se hizo pasar el aire con CO₂ proveniente de la cámara de respiración, por un tiempo de 30 minutos, pasado este tiempo se tituló un blanco con 50 ml de hidróxido de bario Ba (OH)₂ al 0,1N y fenolftaleína como indicador.

La intensidad respiratoria para cada ensayo se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$IR = \frac{(Vb - Vm) * N * \frac{22 \text{ mg } CO_2}{\text{meq}}}{W * t} \quad (2.15)$$

Donde:

IR = Intensidad respiratoria (mg de CO₂ Kg⁻¹ h⁻¹)

Vb = Volumen de ácido oxálico (ml gastados al titular el blanco)

Vm = Volumen de ácido oxálico (ml gastados al titular la muestra)

N = Normalidad del ácido oxálico

W = Peso de la muestra del fruto (Kg)

t = Tiempo de duración de la prueba (h)

▪ Acidez total titulable (ATT)

Para obtener el contenido de ácido se extrajo aproximadamente 5 g de jugo de los frutos, se realizó la titulación con hidróxido de sodio (NaOH) a 0,1N y como indicador 3 gotas de fenolftaleína, el porcentaje de ácido se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$ATT = \left(\frac{V(NaOH) * N * F.A}{Wm} \right) \quad (2.16)$$

Donde,

$V(NaOH)$ = Volumen de NaOH (ml)

N = Normalidad de NaOH (0,1)

$F.A$ = Factor de ácido málico (0,067meq ml⁻¹)

Wm = Peso de la muestra (g)

▪ Sólidos solubles totales (SST)

Para obtener el contenido de azúcares totales se utilizó una muestra de zumo en un refractómetro digital portátil (DR201-95 Krüss) con un rango de medida de 0-95% y precisión de 0,2%, el equipo se calibra para cada medida con agua destilada.

▪ Índice de madurez (IM)

El índice de madurez (IM) (Ecuación 2.17) se determinó como el cociente entre sólidos solubles totales (SST) y la acidez total titulable (ATT).

$$IM = \left(\frac{SST}{ATT} \right) \quad (2.17)$$

▪ Firmeza de endocarpio y pulpa

Para determinar la firmeza de endocarpio y pulpa en los frutos se utilizó el equipo analizador de textura de Brookfield Engineering Labs (Figura 2-19), con precisión 0,02%, 2 mm s⁻¹ de velocidad de prueba, una aguja de 2 mm de diámetro, y programa ejecución TexturePro V1.2. La firmeza de la pulpa se califica como firmeza media y se clasifica en tres intervalos (1-5), (4-6) y (5-7).



Figura 2-19 Analizador de textura Brookfield Engineering Labs.

2.2.7 Análisis Estadístico

Los resultados fueron analizados con el programa IBM SPSS statistics, mediante análisis de varianza (ANOVA) y test de comparación de medias de Duncan, con nivel de significancia de 5%.

3. Resultados y discusión

3.1 Variables climáticas

Durante el periodo de restricción las temperaturas media diaria máxima y mínima promedio fueron de 15,37 (79 DDF) y 10,71°C (77 DDF) respectivamente. Los valores del déficit de presión de vapor (DPV) diario se encontraron en un rango entre 0,183 y 0,696 KPa en los 58 y 94 DDF respectivamente, mostrando una tendencia a disminuir en los días de mayores temperaturas como era de esperarse. La ETo diaria mostro un comportamiento oscilante con una tendencia de aumento partir de 20 DDF disminuyendo a causa de las precipitaciones como se evidenció entre los 51 y 58 DDF, así como a los 107 DDF donde hubo de nuevo una tendencia a disminuir por esta causa (Figura 3-1).

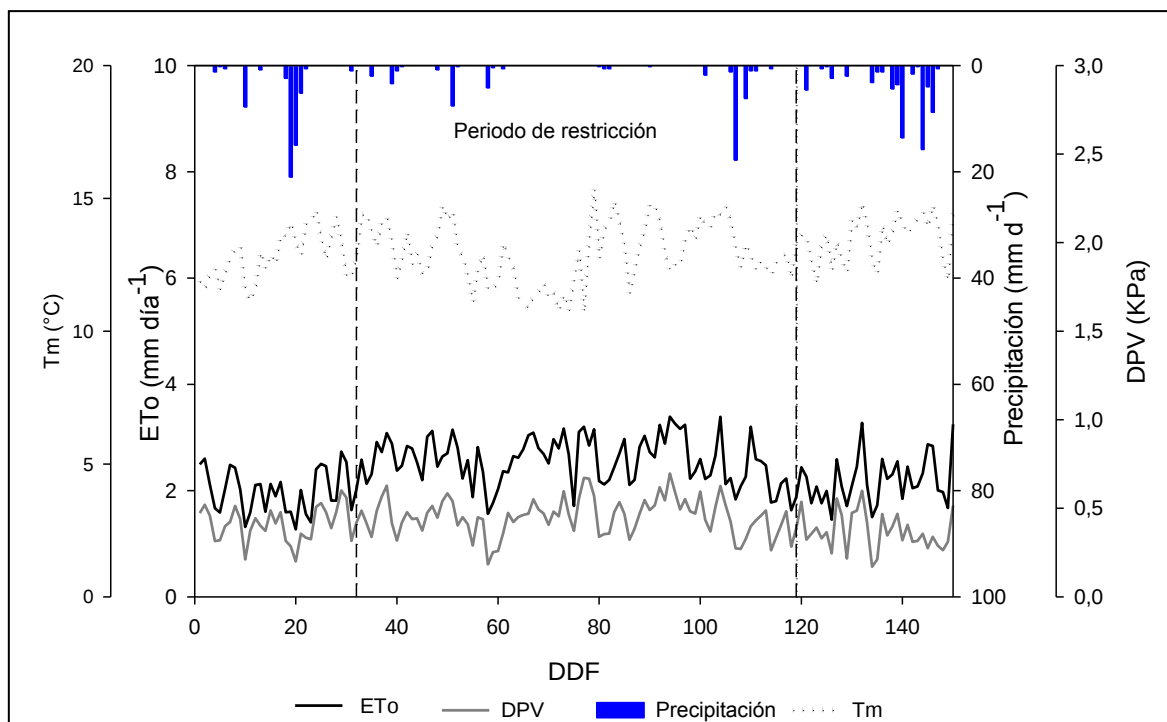


Figura 3-1 Temperatura media diaria (Tm), evapotranspiración potencial diaria (ETo), precipitación diaria y déficit de presión de vapor diario (DPV) durante el periodo de investigación.

3.2 Volumen de agua aplicada

El balance hídrico desde noviembre de 2012 hasta marzo de 2013 muestra que se presenta un déficit de la semana 4 a la 15 y de la 17 a la 19, aspecto que está dado por las bajas precipitaciones efectivas en este periodo señalado (Figura 3-2).

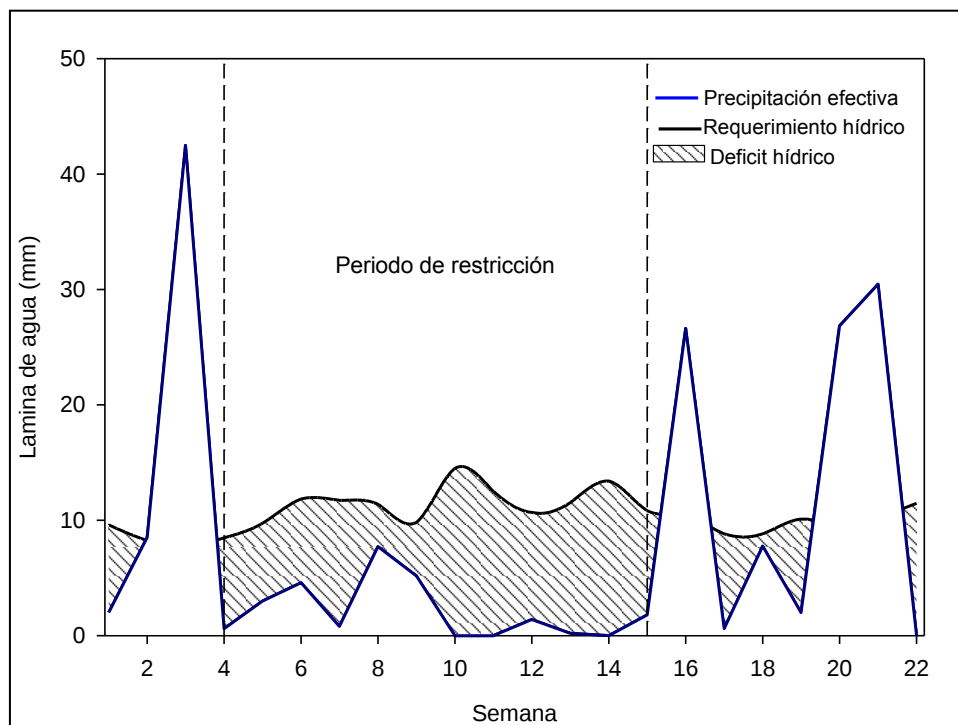


Figura 3-2 Balance hídrico cultivo de Pera (Variedad Triunfo de Viena) en Sesquilé, Cundinamarca.

El comportamiento del balance hídrico durante el ciclo del cultivo comprendido entre octubre de 2012 y marzo de 2013, permitió que se realizaran las restricciones de riego desde los 32DDF (momento en el cual los frutos se encontraban en la etapa de rápido crecimiento) hasta los 119DDF (87 días en total). El volumen de agua aplicada durante esta etapa en los tratamientos T1, T2 y T3, fue de 912,20 (57,01 mm), 667,11 (41,69 mm) y 482,11 (30,13 mm) litros árbol⁻¹ respectivamente, oscilando entre 9,70 (0,61 mm), 7,09 (0,44 mm) y 5,13 (0,32 mm) litros árbol⁻¹ por día (Figura 3-3).

Durante el periodo de restricción de riego, la precipitación (Pt) fue de 51,60 mm y la evapotranspiración potencial (ET_o) de 352,480 mm con un promedio de 4,051 mm día⁻¹. Las reducciones de la lámina de riego en los tratamientos deficitarios durante el periodo representaron un ahorro de agua de 26,87 y 47,15%.

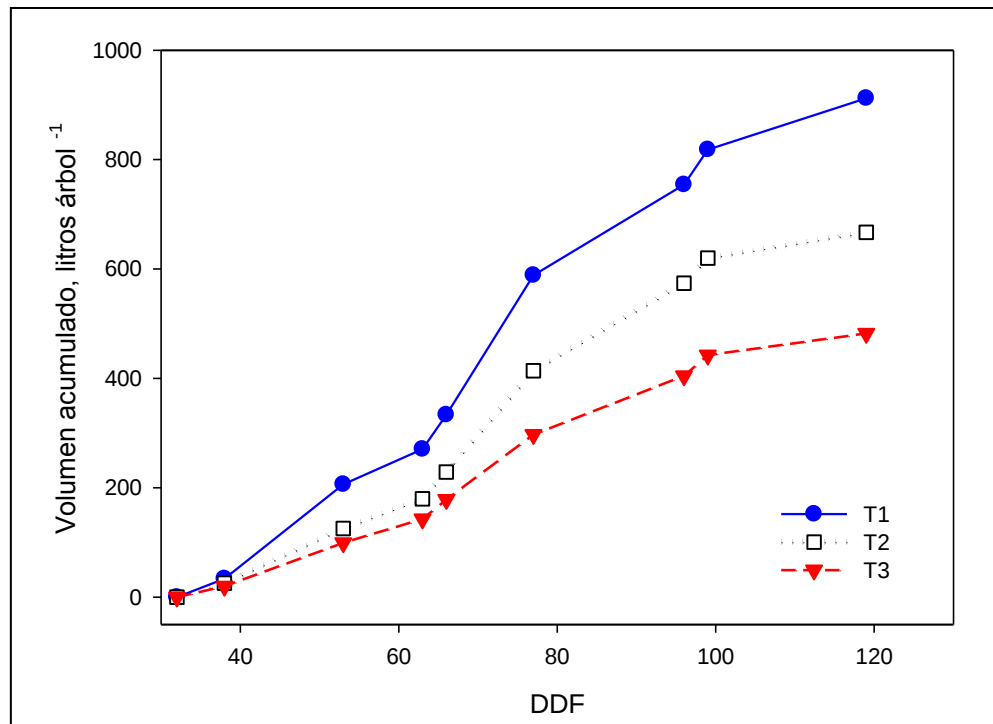


Figura 3-3 Volumen de agua aplicado en l árbol⁻¹, acumulado durante el periodo de riego deficitario para los tratamientos T1, T2 y T3.

3.3 Relaciones hídricas

3.3.1 Condición hídrica del suelo

▪ Medida de la humedad volumétrica del suelo (θ_v)

Durante el periodo de restricción hídrica, la humedad volumétrica media del suelo θ_v , en los tratamientos T1, T2 y T3 fue de 25,09; 23,24 y 19,85% con valores máximos de 27,33 (106DDF), 25,23 (106DDF) y 22,90% (63DDF) respectivamente, el valor de la θ_v en el tratamiento T1 estuvo cercano a la capacidad de campo (26,9%); los tratamientos T2 y T3 presentaron valores menores respecto a T1 como era de esperarse. Se observaron valores mayores al punto de marchitez permanente (15,3%), con diferencias significativas ($p < 0,05$) del tratamiento T3 respecto a T1 y T2, correspondiendo así a la lámina deficitaria de riego

aplicada. Estos valores de θ_v fueron menores a los reportados por Molina (2014) durante el estudio del efecto de la aplicación de tres láminas de riego en el mismo suelo y parcela utilizados para este experimento.

Como es conocido, la reserva teórica de humedad del suelo está definida como $CC - PMP$, la θ_v llega a representar un porcentaje de esta reserva teórica (Pr) Ecuación 3.1:

$$Pr = \left[\frac{\theta_v - PMP}{CC - PMP} \right] * 100 \quad (3.1)$$

El agotamiento de dicha reserva se define como $100 - Pr$. En el presente estudio se observó que los árboles que estuvieron bajo los tratamientos deficitarios T2 y T3, agotaron en promedio el 31,51 y 60,77%, de la reserva de humedad del suelo respectivamente, las cuales fueron recuperadas a consecuencias de las precipitaciones acontecidas en el periodo experimental (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Humedad volumétrica media (θ_v) a una profundidad de 30 cm y porcentaje de reserva teórica del suelo.

DIA	θ_v (%)			% DE RESERVA TEÓRICA DEL SUELO		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
32	21,23	19,95	21,63	48,85	59,91	45,40
38	24,33	22,30	20,73	22,13	39,66	53,16
43	25,60	24,57	20,70	11,21	20,11	53,45
53	27,00	24,80	18,65	-0,86	18,10	71,12
63	25,10	24,57	22,90	15,52	20,11	34,48
72	24,33	22,30	20,73	22,13	39,66	53,16
77	25,60	24,60	17,80	11,21	19,83	78,45
86	25,58	23,07	18,90	11,42	33,05	68,97
97	24,03	23,95	20,03	24,71	25,43	59,20
106	27,33	25,23	18,95	-3,74	14,37	68,53
111	24,60	22,85	17,80	19,83	34,91	78,45
119	26,35	20,75	19,38	4,74	53,02	64,87
PROMEDIO	25,09a	23,24a	19,85b	15,60	31,51	60,77

▪ **Medida del potencial matricial del agua en el suelo (ψ_s)**

Durante la restricción de riego en el periodo experimental, el potencial matricial de agua en el suelo (ψ_s) (Figura 3-4), llegó a valores mínimos de -111,40; -123,00 KPa a los 119DDF y -145,40 KPa a los 106DDF en los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente.

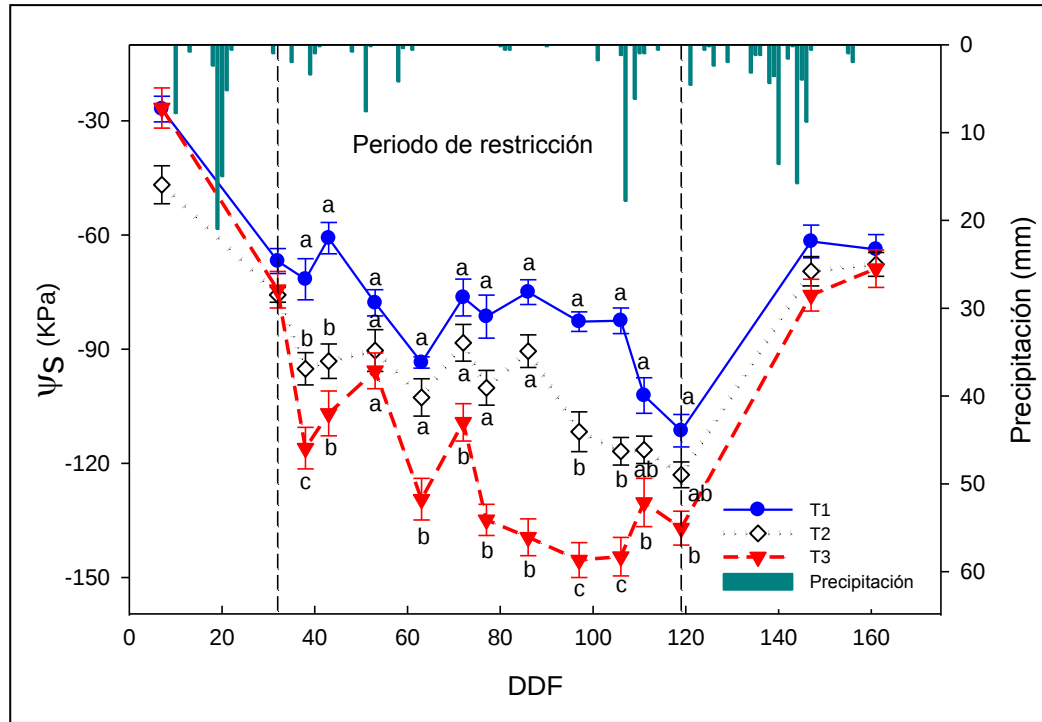


Figura 3-4 Precipitación y potencial matricial del suelo (ψ_s) a una profundidad de 0,6 m. Las barras indican el error estándar, letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), según la prueba de Duncan.

Los menores valores de ψ_s se presentaron en el tratamiento de mayor reducción de la lámina de agua en el riego (T3), con diferencias respecto al tratamiento bien regado (T1) en todo el periodo excepto, a los 53, 147 y 161 de DDF debido a las precipitaciones que provocaron una recuperación y nivelación en los tratamientos (Figura 3-4). Este resultado corroboró con claridad la efectiva sensibilidad y precisión al ciclo de secado y humedecimiento de los sensores que monitoreaban la humedad del suelo utilizados en el experimento. También se apreció que el tratamiento de riego intermedio (T2) presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en el ψ_s respecto a tratamiento control (T1) solo a los 38, 43, 96 y 106 DDF.

De forma general se puede definir que el Ψ_s tuvo un comportamiento de acuerdo a la aplicación de riego, recuperándose cuando se presentaron las lluvias hasta igualarse a los (161DDF) correspondiendo así a la diferencia del potencial mátrico del suelo de acuerdo a con la lámina de riego aplicada.

3.3.2 Condición hídrica de la planta

▪ Potencial hídrico al tallo (Ψ_t)

Durante la restricción del riego, el Ψ_t (Figura 3-5), mostró de forma general un comportamiento similar en todos los tratamientos, con algunas excepciones que percibían una ligera disminución en el tratamiento de mayor reducción de la lámina de riego en los momentos en que no ocurrieron precipitaciones. Los valores más altos se presentaron al inicio de la restricción del riego. Este comportamiento se explica en principio por la edad de las hojas (Jiménez y Gutiérrez, 2011), debido a que en esta primera etapa de evaluaciones las hojas eran más jóvenes, también se estima que algunos indicadores climáticos como la nubosidad y la intensidad de la radiación solar pueden haber influido en estos valores.

En el tratamiento T3, al que se le aplicó la menor lamina de riego, tuvo los valores más bajos de Ψ_t (-1,05 MPa) y el tratamiento Control (T1) los más altos (-0,96 MPa) en 106DDF, estos valores son menores a los encontrados por Molina (2014), en la misma parcela durante el ciclo de 2011 a 2012 aplicando láminas de riego correspondientes al 67 y 55% de la ETc, con Ψ_t promedio de -0,65 y -0,42 MPa respectivamente. Este comportamiento también sugiere que se haga un estudio del curso diario del estado hídrico del cultivo para definir el mejor momento de evaluación.

Es de especificar que durante los 87 días de restricción del riego, el Ψ_t disminuyó de forma similar en los tres tratamientos como fue mencionado, y las precipitaciones presentadas de 17,80; 6,20; 1,00 y 1,00 mm a los 107, 109, 110 y 111DDF respectivamente, provocaron un aumento o recuperación del Ψ_t (119DDF) con valores entre los -0,95 y -0,95 MPa para los diferentes tratamientos. Los valores encontrados en los potenciales de tallo al mediodía

solar son considerados como los típicos para árboles frutales de estas características cuando están bien abastecidos hídricamente. Resultados similares fueron obtenidos por Galindo *et al.* (2014); Rodríguez *et al.* (2012) en el cultivo del granado, por Cruz *et al.* (2012) en arboles de jinjolero (*Zizyphus jujuba*), y Mellisho *et al.* (2011) estudiando los mecanismos de resistencias al estrés hídrico en melocotonero expuesto a diferentes niveles de riego en la región mediterránea. En todos estos estudios mencionados coincidieron las evaluaciones con la fase de rápido crecimiento del fruto tal y como se desarrolló el experimento del presente estudio. Por otra parte, Morandi *et al.* (2014) encontró que para el cultivo de pera variedad Abbè fétel, con una aplicación del 25% de ETc, el Ψ_t estaba en un rango de variación de -1,22 a -0,30 MPa, lo que coinciden también de forma general con los resultados encontrados en este estudio independientemente de los tratamientos aplicados.

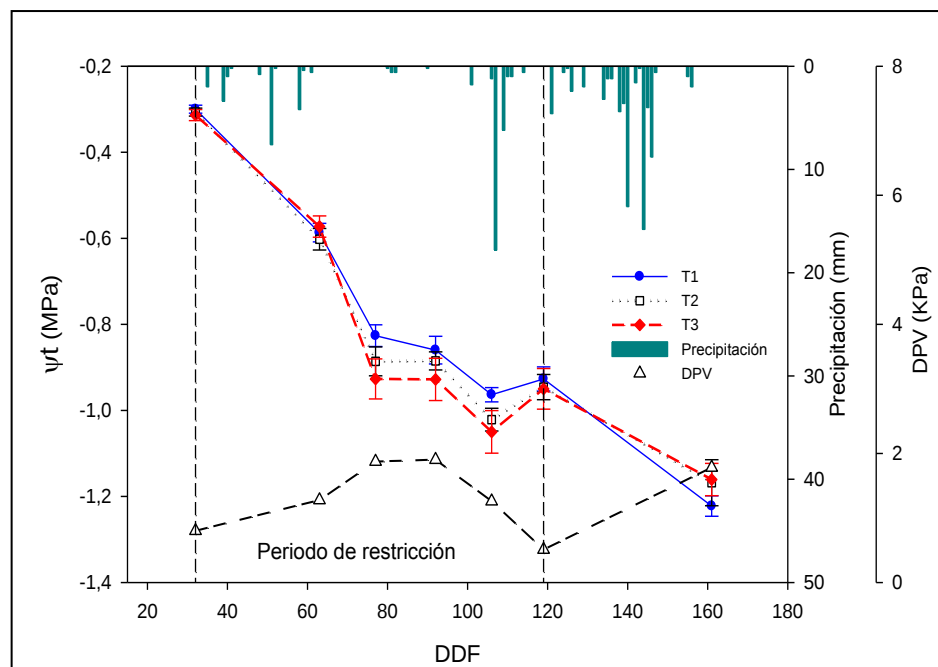


Figura 3-5 Precipitación, déficit de presión de vapor (DPV) y evolución del potencial al tallo (Ψ_t) en los tratamientos T1, T2 y T3 durante la restricción, los valores corresponden a la media de tres hojas por árbol en ocho árboles por tratamiento, las barras indican el error estándar.

En la Figura 3-6, se observa la evolución diaria del potencial hídrico foliar (Ψ) en el tratamiento control (T1) bajo condiciones apropiadas de suministro hídrico. Se observa que el Ψ es directamente proporcional a la demanda evaporativa, oscilando entre -0,22 a -1,42

MPa entre las 4:00 y las 14:00 horas solar, disminuyendo gradualmente en la mañana, estabilizándose al medio día e iniciando su recuperación a partir de las 14:00 horas, el mismo comportamiento encontrado por Cruz *et al.* (2012) en *Zizyphus jujuba* y Vélez *et al.* (2005) en clementinas ambos estudios en condiciones de clima mediterráneo.

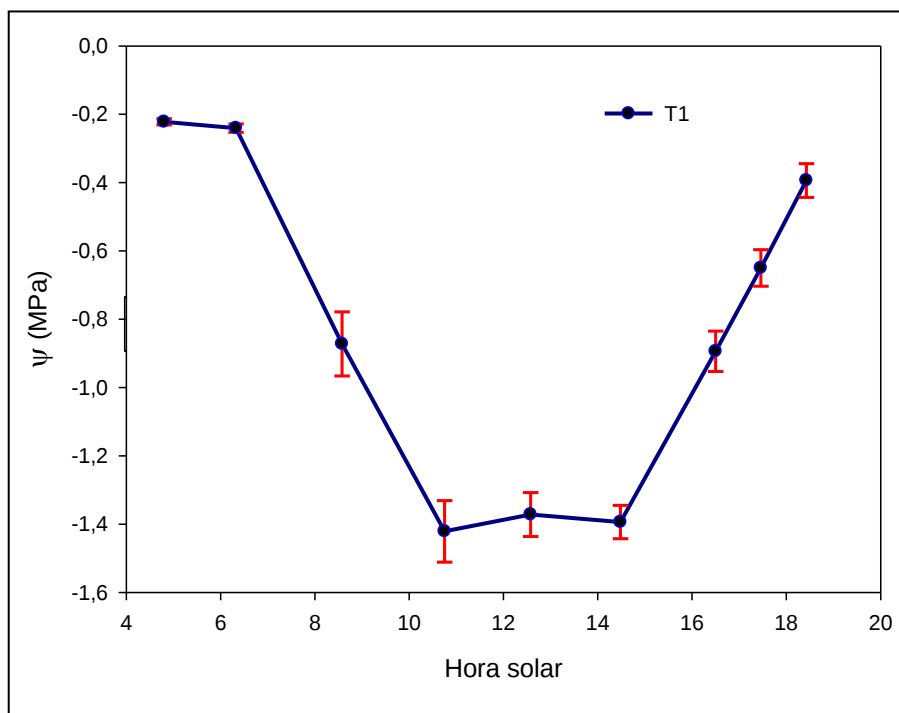


Figura 3-6 Evolución diaria del potencial hídrico foliar (Ψ) en el tratamiento control (T1), bajo condiciones apropiadas de suministro hídrico, las barras indican el error estándar.

También se observó (Figura 3-6), que el potencial hídrico foliar se relacionó de forma inversa con el déficit de presión de vapor, con Ψ mayores cuando el DPV disminuye (datos sin mostrar), resultados similares fueron encontrados por Measham *et al.* (2014) en cerezo dulce (*Prunus avium* L.); Vélez *et al.* (2007a) en clementinas; Morandi *et al.* (2014) en pera variedad Abbé Fétel y Molina (2014) en el mismo cultivo.

▪ Curva presión volumen

En la Figura 3-7 se presenta las curvas presión - volumen correspondientes a tres tratamientos, graficadas con los valores medios que se obtuvo de cada repetición, se observa la ecuación de ajuste de la Hyperbola Modificada II y el coeficiente de determinación (R^2) significativo encontrado para cada uno de los tratamientos.

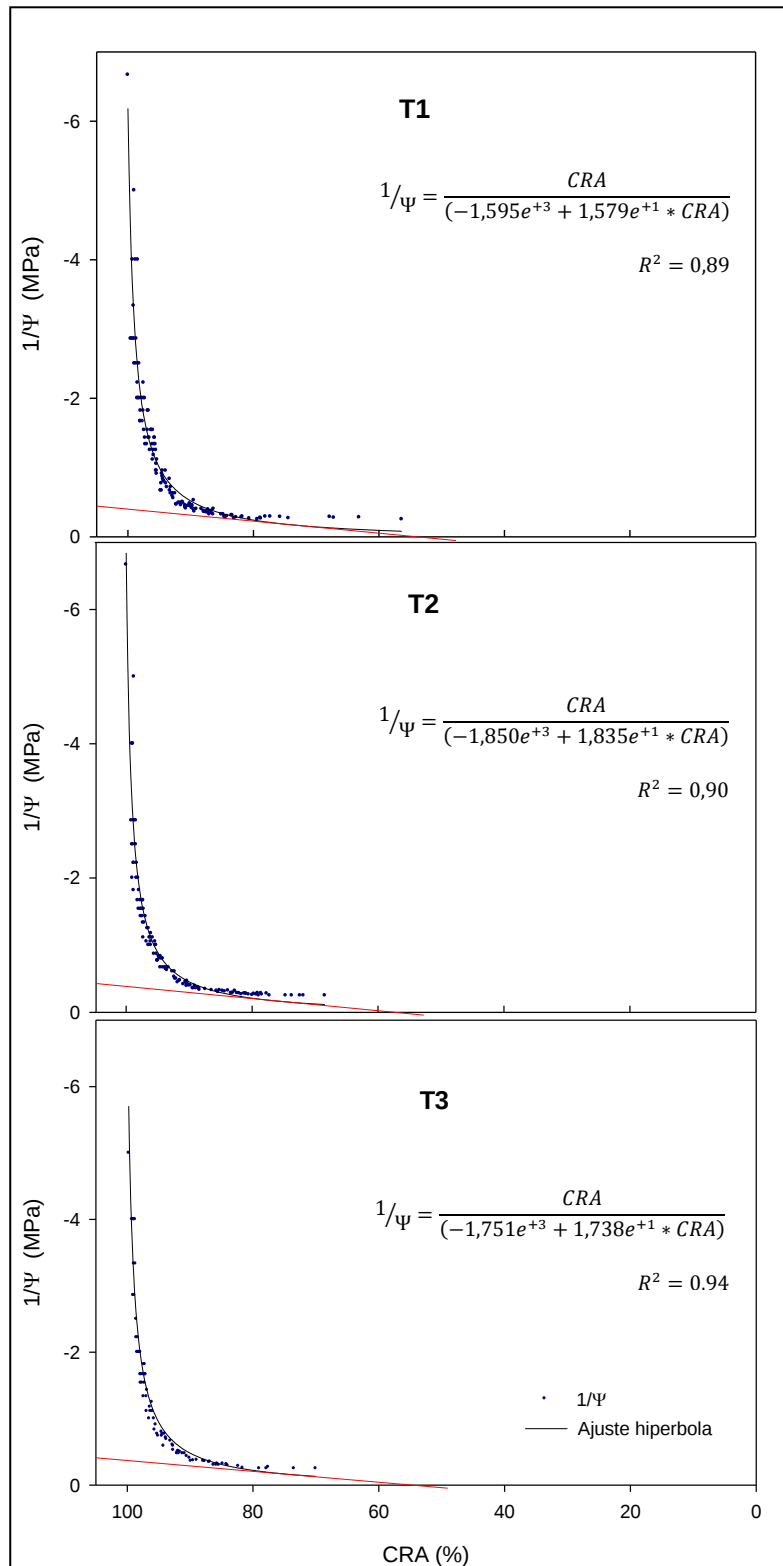


Figura 3-7 Isotermas presión – volumen, ecuaciones de ajuste y coeficiente de determinación para T1, T2 y T3.

El potencial osmótico (Tabla 3-2) no mostro diferencias significativas entre tratamientos, los valores medios fueron de -2,29; -2,35 y -2,40 MPa para T1, T2 y T3, respectivamente, lo cual indica que no se afectaron los tratamientos en este indicador por las dosis de riego aplicadas.

También mediante las isotermas presión volumen para cada una de las repeticiones de los tres tratamientos se obtuvo información sobre el estado hídrico de las hojas tales como contenido hídrico foliar (CHf), contenido relativo de agua en el punto de pérdida de turgencia (CRAppt), contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_{oppt}) y elasticidad máxima (ϵ_{max}) (Tabla 3-2).

Tabla 3-2 Efecto de la restricción en las hojas. Contenido hídrico foliar (CHf), potencial Osmotico saturado (Ψ_{os}), contenido relativo de agua en el punto de pérdida de turgencia (CRAppt), contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_{oppt}) y módulo de elasticidad máximo (ϵ_{max}), letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$), según prueba de Duncan.

Parámetro	T1	T2	T3
CHf (%)	63,847a	63,036a	62,492a
Ψ_{os} (MPa)	-2,286a	-2,355a	-2,357a
CRAppt (%)	74,121a	75,452a	78,070a
CRAa (%)	49,020a	51,690ab	59,920b
Ψ_{oppt} (Mpa)	-4,728a	-4,715a	-5,140a
ϵ_{max} (Mpa)	13,890a	13,900a	14,870a

El potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_{oppt}), no presentó cambios entre tratamientos, esto indica que la planta no evidenció como mecanismo de tolerancia el ajuste osmótico para mantener el gradiente hídrico desde el suelo hasta las hojas, puede ser porque para evidenciar este mecanismo se necesita que el estrés hídrico se desarrolle progresivamente durante un tiempo prolongado y/o que fuera muy severo (Cruz *et al.* 2012; Arndt *et al.* 2001) y en éste caso el tiempo de la restricción al momento de la medición era corto (92DDF), por lo que esta conclusión es adecuada en principio solo para las condiciones estudiadas.

A partir del análisis de las isoterma P-V, se observó que los valores de (ϵ_{max}) son similares entre los tratamientos, lo que indica que **no se desarrolló un ajuste elástico** en

respuesta al estrés hídrico, similar se comportó el CRAppt sin diferencias entre tratamientos, Savé *et al.* (1995) afirman que esto es un indicador de que los valores de CRAppt son influenciados directamente por E_{max} .

Es muy importante señalar las diferencias encontradas entre el tratamiento control (T1) y el menos abastecido de agua (T3), en cuanto al Contenido Relativo de Agua apoplástica (CRAa) lo que se puede interpretar como un **mecanismo de adaptación al estrés hídrico** (Serrano *et al.*, 2005), ya que se realiza un cambio estructural en la pared celular permitiendo una mayor acumulación de agua en el apoplasto (Cruz *et al.*, 2012). Los valores de CRAa encontrados (49-60%) fueron altos en comparación con los encontrados por Cruz *et al.* (2012) en jinjolero (*Zizyphus jujuba*) (29-41%) y Rodríguez *et al.* (2012) en arboles de granada (41-54%), lo que puede estar relacionado en que estas especies fueron cultivadas en un clima semiárido, diferente al que se desarrolló el experimento en estudio, también pudo deberse a la alta resistencia de esas especies al déficit hídrico.

3.4 Cuajado y caída de frutos

No se encontraron diferencias entre los tratamientos en cuanto al porcentaje de cuajado y caída fisiológica de frutos, lo que indica que la restricción aplicada durante el ciclo de 2011 a 2012 con láminas de riego correspondientes al 67 y 55% de la ETc para los tratamientos T2 y T3, no afectó el cuajado y caída de frutos al segundo año de aplicar estas restricciones. Resultados similares a los reportados por Pierantozzi *et al.* (2013) en arboles de olivo (*Olea europea* L. cvs. Arbequina and Manzanilla) con aplicación de láminas de riego de 75 y 50% de ETc durante dos años.

El número y porcentaje de frutos cuajados en el presente estudio fue del 12,72%, 16,79% y 13,77% para los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente. La caída fisiológica fue mayor en el tratamiento deficitario del 40% de los frutos en comparación con el tratamiento control que tuvo el 21% (Figura 3-8). Girona *et al.* (2003) encontraron que el estrés hídrico en árboles de durazno disminuía la caída de frutas antes de la última fase de crecimiento, igual fue encontrado por Intrigliolo *et al.* (2012) en frutos de granado a los que se les aplicó riego deficitario controlado durante el periodo de floración y cuajado.

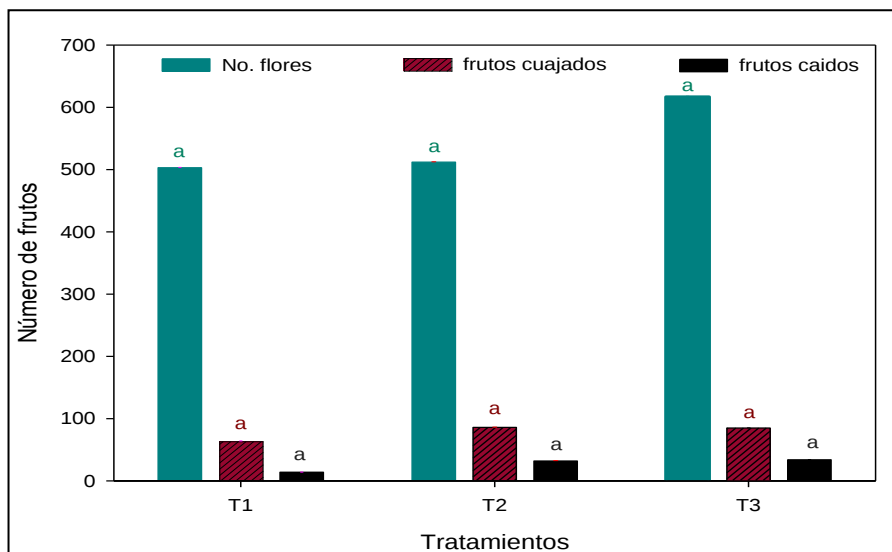


Figura 3-8 Número promedio de flores (No. flores), número de frutos cuajados y número de frutos caídos.

3.5 Crecimiento de frutos

Las curvas descritas por el crecimiento en términos de diámetro ecuatorial y longitud de los frutos en función del tiempo, durante el estudio corresponden a un modelo de tipo sigmoidal simple presentando tres fases como lo describe Yang *et al.* (2013), fase I, de división celular que se presenta los primeros 45 días después de la floración (DDF), fase II, de elongación o expansión celular entre 46 y 119 DDF que se caracteriza por un crecimiento rápido del fruto y fase III, etapa de maduración desde 120 DDF hasta la cosecha (Figuras 3-9 y 3-10).

El aumento del diámetro ecuatorial (Figura 3-9) y de la longitud (Figura 3-10) se ajustó a una curva logística de 3 parámetros, con ecuación:

$$y = a/1 + b * e^{(-cx)} \quad (3.2)$$

Donde:

y = dimensión del fruto

a = máxima dimensión final del fruto

b = día en que se presenta la mayor tasa de crecimiento

c = tasa relativa de crecimiento en el punto de inflexión

En la Tabla 3-3 se presenta las ecuaciones del modelo de ajuste del diámetro ecuatorial del fruto en cada tratamiento.

Tabla 3-3 Ecuaciones del modelo logístico de crecimiento de diámetro ecuatorial del fruto.

Tratamiento	Diámetro ecuatorial de fruto	
	Modelo	R ²
T1	$De = 7,9818 / (1 + 4,3248e^{(-0,0205DDF)})$	0,9966
T2	$De = 7,4829 / (1 + 4,3231e^{(-0,0200DDF)})$	0,9978
T3	$De = 7,4713 / (1 + 4,4673e^{(-0,0203DDF)})$	0,9964

De acuerdo con los parámetros encontrados en el modelo de ajuste logístico el mayor valor del diámetro ecuatorial y longitud que podría presentarse sería de 7,98 y 11,41cm, respectivamente, correspondiente a los frutos del tratamiento T1. La tendencia de crecimiento en términos de diámetro ecuatorial y longitud de frutos no presento diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos.

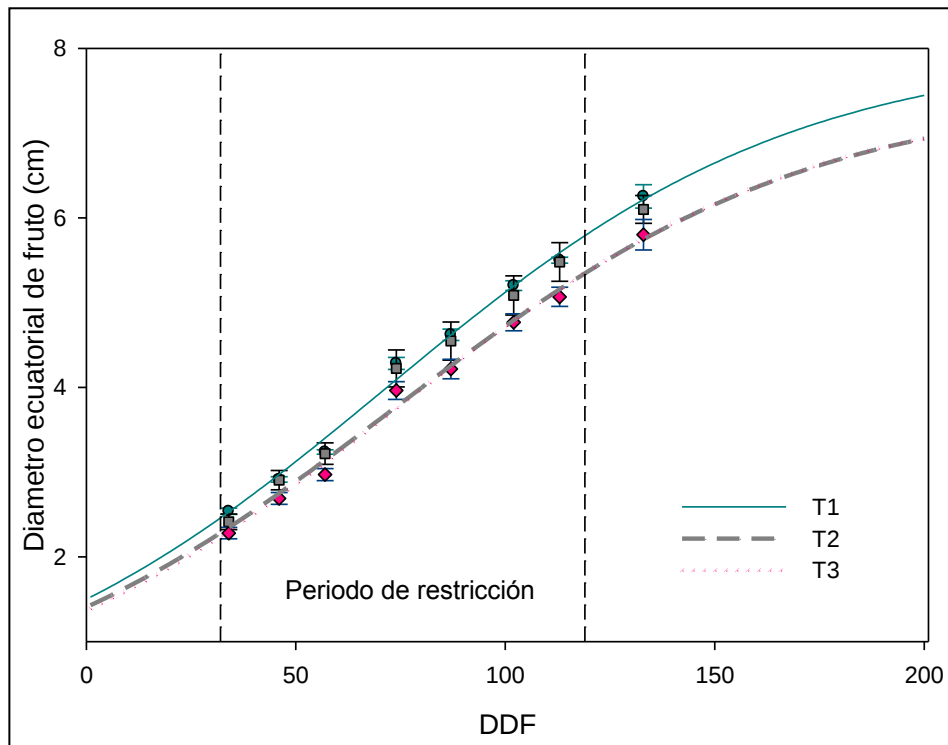


Figura 3-9 Curvas de crecimiento del diámetro ecuatorial de los frutos con ajuste logístico de tres parámetros, las barras indican el error estándar.

Los valores de crecimiento de diámetro ecuatorial que se obtuvo al finalizar la fase I fueron de 2,54; 2,41 y 2,28 cm para el tratamiento T1, T2 y T3, respectivamente. En la fase II con una duración de 87 días se obtuvo diámetros ecuatoriales de 5,79; 5,35 y 5,35 cm para el tratamiento T1, T2 y T3, respectivamente. La fase III finalizó con diámetros de 6,65; 6,16 y 6,17 cm para el tratamiento T1, T2 y T3, respectivamente. Valores similares fueron encontrados por Arenas (2011) y Molina (2014) que reportan un ajuste de crecimiento diferente en el mismo cultivo.

Durante los días de restricción no hubo diferencias en el diámetro de frutos, y el mismo tuvo un aumento lento debido a que en esta etapa el fruto crece a expensas de carbohidratos que el árbol almacena en tallo y raíces, como ha sido informado por otros autores en pera Ningbo *et al.* (2009), en manzana Parra *et al.* (2008) y en clementinas Vélez *et al.* (2005).

En la Tabla 3-4 se presenta las ecuaciones del modelo de ajuste de la longitud del fruto en cada tratamiento.

Tabla 3-4 Ecuaciones del modelo logístico de crecimiento de longitud del fruto.

Tratamiento	Longitud de fruto	
	Modelo	R ²
T1	$Lo = 11,4082 / (1 + 4,6066e^{(-0,01603DDF)})$	0,9973
T2	$Lo = 11,0217 / (1 + 4,5359e^{(-0,0162DDF)})$	0,9977
T3	$Lo = 10,1211 / (1 + 4,2164e^{(-0,0167DDF)})$	0,9973

Los valores de crecimiento de longitud obtenidos al finalizar la fase I fueron de 3,06; 3,02 y 2,97 cm, en la fase II con una duración de 87 días 6,78; 6,64 y 6,43 cm y en la fase III se alcanzó longitudes de 8,06; 7,88 y 7,54 para el tratamiento T1, T2 y T3, respectivamente. Valores similares a los encontrados por Arenas (2011) y Molina (2014) que reporta el mismo ajuste de crecimiento y valores similares en el mismo cultivo.

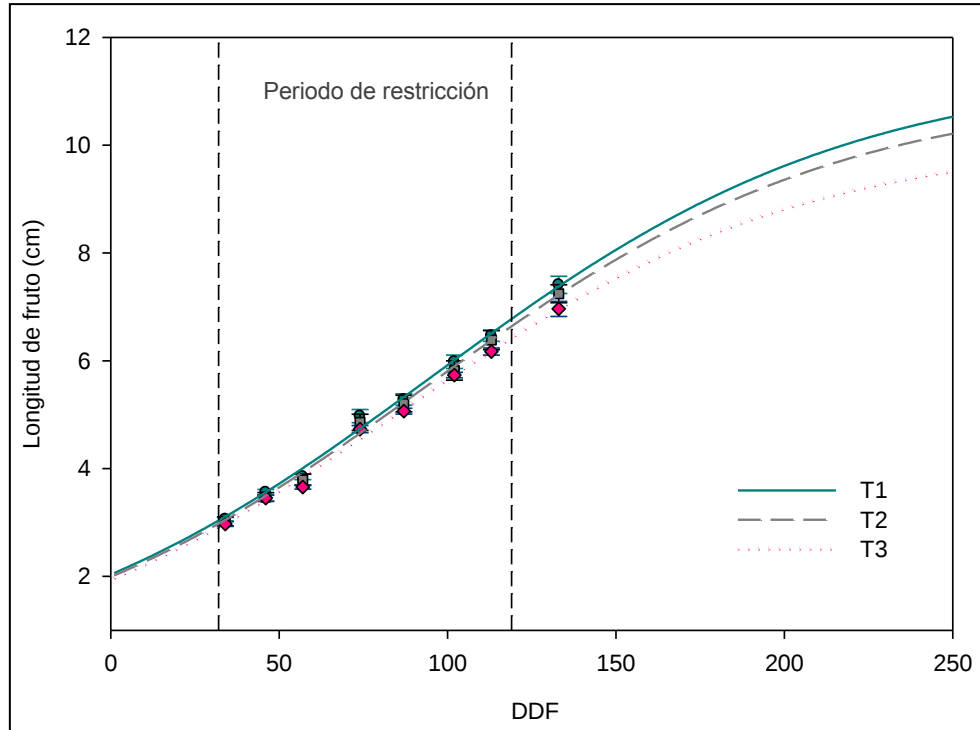


Figura 3-10 Curvas de crecimiento en la longitud de los frutos con ajuste logístico de tres parámetros, las barras indican el error estándar.

▪ Tasa absoluta y relativa de crecimiento

La tasa absoluta de crecimiento (TAC) de los frutos mostro una tendencia típica de una campana de Gauss igual en los tres tratamientos, corroborando resultados encontrados en pera por Molina (2014) y Yang *et al.* (2013), en mandarina por Conesa *et al.* (2014), en manzana por Yuri *et al.* (2011) y en tomate por Ardila *et al.* (2011). Los valores máximos de TAC de diámetro ecuatorial y longitud de fruto se presentaron a los 71 y 96 DDF en la fase II igual a 0,0484 cm día⁻¹ y 0,0457 cm día⁻¹ respectivamente. Después de terminar la restricción hídrica se evidenció una disminución de la TAC en la longitud mientras que en el diámetro ecuatorial empieza la disminución durante la restricción, además se observó que la TAC de T1 se mantiene mayor a la de T2 y T3 (Figura 3-11).

La ecuación del modelo que se obtuvo para TAC de diámetro ecuatorial y longitud de frutos es:

$$y = \frac{(a * b * c * e^{-cx})}{(b * e^{-cx} + 1)^2} \quad (3.3)$$

Donde:

y = Tasa absoluta de crecimiento del fruto

a = máxima dimensión final del fruto

b = día en que se presenta la mayor tasa de crecimiento

c = tasa relativa de crecimiento en el punto de inflexión

En la Tabla 3-5 se presenta las ecuaciones del modelo de la TAC de diámetro y longitud del fruto en cada tratamiento.

Tabla 3-5 Ecuaciones del modelo de la TAC de diámetro y longitud del fruto.

TAC Diámetro ecuatorial	
Tratamiento	Modelo
T1	$TAC(De) = \frac{(7,9818 * 4,3247 * 0,0205 * e^{-0,0205DDF})}{(4,3237 * e^{-0,0205DDF} + 1)^2}$
T2	$TAC(De) = \frac{(7,4829 * 4,3231 * 0,0200 * e^{-0,0200DDF})}{(4,3231 * e^{-0,0200DDF} + 1)^2}$
T3	$TAC(De) = \frac{(7,4713 * 4,4673 * 0,0203 * e^{-0,0203DDF})}{(4,4673 * e^{-0,0203DDF} + 1)^2}$
TAC Longitud de fruto	
T1	$TAC(Lo) = \frac{(11,4082 * 4,6066 * 0,0160 * e^{-0,0160DDF})}{(4,6066 * e^{-0,0160DDF} + 1)^2}$
T2	$TAC(Lo) = \frac{(11,021 * 4,5359 * 0,0162 * e^{-0,0162DDF})}{(4,5359 * e^{-0,0162DDF} + 1)^2}$
T3	$TAC(Lo) = \frac{(10,1211 * 4,2164 * 0,0167 * e^{-0,0167DDF})}{(4,2164 * e^{-0,0167DDF} + 1)^2}$

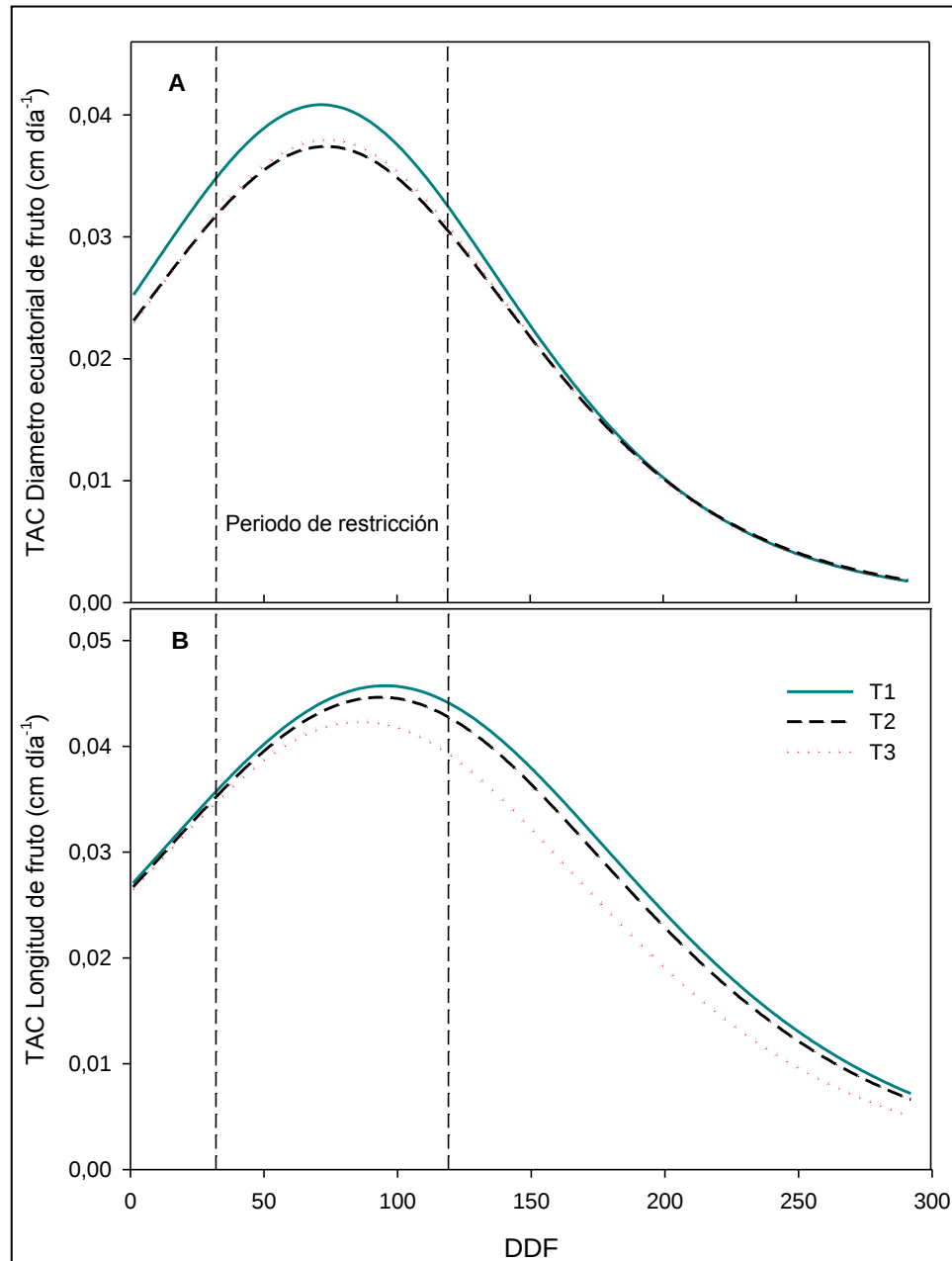


Figura 3-11 Tasa absoluta de crecimiento (TAC) de diámetro ecuatorial (A) y longitud de frutos (B).

La tasa relativa de crecimiento (TRC) de diámetro ecuatorial y longitud de frutos, muestra una tendencia igual entre tratamientos (Figura 3-12). En la fase I de crecimiento se observa una disminución lenta mientras que en la fase II aumenta progresivamente, similar a lo encontrado por Molina (2014) y Ardila *et al.* (2011) y diferente a los resultados en manzana encontrado por Stajanko *et al.* (2013).

La ecuación del modelo que se obtuvo para TRC de diámetro ecuatorial y longitud de frutos es:

$$y = \frac{b * c * e^{-cx}}{1 + b * e^{-cx}} \quad (3.4)$$

Donde:

y = Tasa relativa de crecimiento del fruto

a = máxima dimensión final del fruto

b = día en que se presenta la mayor tasa de crecimiento

c = tasa relativa de crecimiento en el punto de inflexión.

En la Tabla 3-6 se presenta las ecuaciones del modelo de la TRC de diámetro ecuatorial y longitud del fruto en cada tratamiento.

Tabla 3-6 Ecuaciones del modelo de la TAC de diámetro ecuatorial y longitud del fruto.

Tratamiento	Modelo
TRC diámetro ecuatorial	
T1	$TRC(De) = \frac{(4,3248 * 0,0205 * e^{-0,0205DDF})}{1 + 4,3248 * e^{-0,0205DDF}}$
T2	$TRC(De) = \frac{(4,3231 * 0,0200 * e^{-0,0205DDF})}{1 + 4,3231 * e^{-0,0200DDF}}$
T3	$TRC(De) = \frac{(4,4673 * 0,0203 * e^{-0,0203DDF})}{1 + 4,4673 * e^{-0,0203DDF}}$
TRC longitud de fruto	
T1	$TRC(Lo) = \frac{(4,3248 * 0,0205 * e^{-0,0205DDF})}{1 + 4,3248 * e^{-0,0205DDF}}$
T2	$TRC(Lo) = \frac{(4,5359 * 0,0162 * e^{-0,0162DDF})}{1 + 4,5348 * e^{-0,0162DDF}}$
T3	$TRC(Lo) = \frac{(4,2164 * 0,0167 * e^{-0,0167DDF})}{1 + 4,2164 * e^{-0,0167DDF}}$

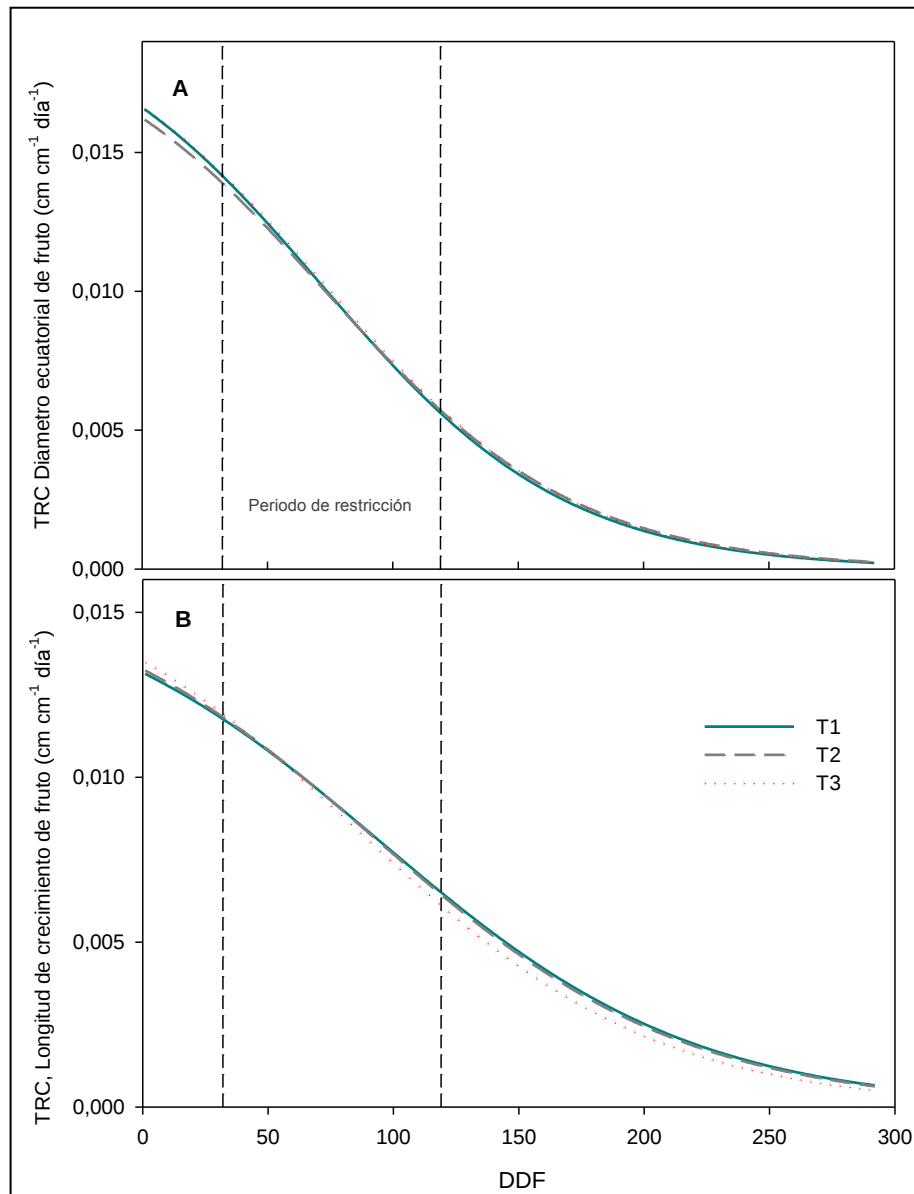


Figura 3-12 Tasa relativa de crecimiento (TRC) de diámetro ecuatorial (A) y longitud de frutos (B).

3.6 Producción y calidad

En cuanto a la producción y la calidad, no se presentaron diferencias de los tratamientos deficitarios respecto al control (T1) en producción, número de frutos por árbol y parámetros de calidad, posiblemente esto se deba a que los niveles de estrés no fueron suficientemente severos y/o que el mecanismo de tolerancia manifestado por el cultivo fue suficiente para mantener un buen estado hídrico de las plantas, también se pudo deber a

una regulación estomática como experimentan en otras especies frutales cuando se exponen a déficit hídrico Cruz *et al.* (2012) en jinjolero y Rodríguez *et al.* (2012) en granado.

3.6.1 Producción

Como se puede observar en el calibre o tamaño de frutos no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 3-13), aunque el T1 tuvo el mayor porcentaje de frutos en los calibres > 68 mm y < 61 mm mientras que el tratamiento menos regado T3 tuvo un menor porcentaje calibre >68 mm y mayor en el calibre medio de 62 a 68 mm. El número de frutos calibre 62 a 68 mm son casi iguales en los tres tratamientos, resultados similares a los obtenidos por Vivas *et al.* (2011) en pera variedad Ercolini con una lámina de riego del 50% de ETc y por Marsal *et al.* (2012) quienes encontraron que no existe reducción en el tamaño de los frutos de pera variedad Conference a consecuencia del déficit hídrico.

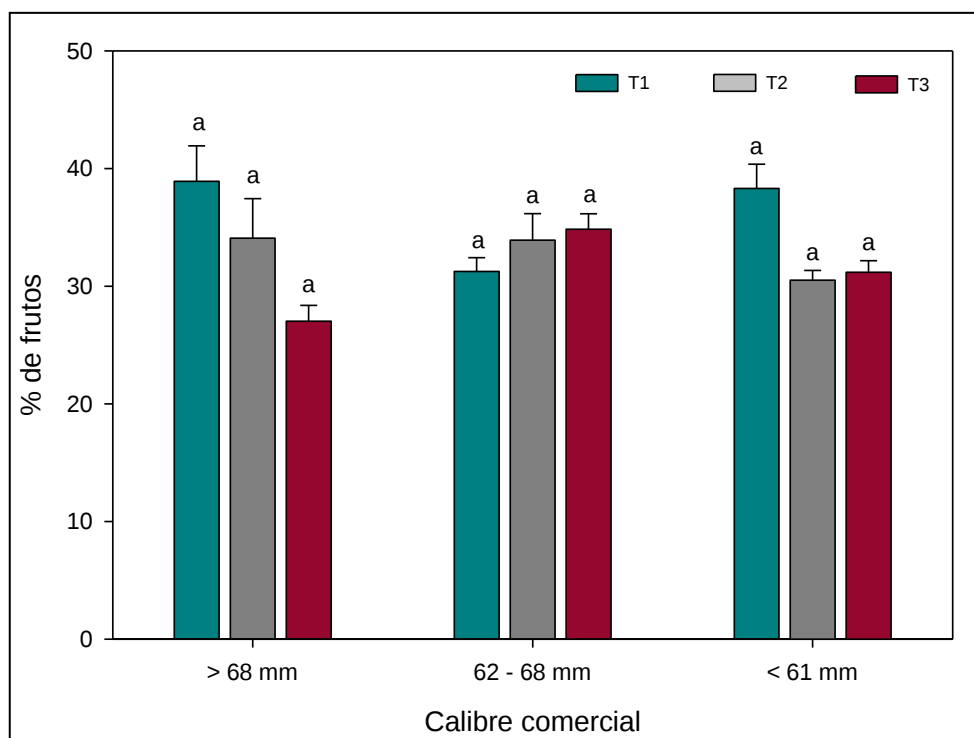


Figura 3-13 Porcentaje medio de calibres en frutos por tratamientos.

En la Tabla 3-7 (parámetros de producción), se puede observar que no hay diferencias entre tratamientos aplicados en ninguno de los indicadores evaluados, el mayor peso

medio de frutos (201,59 g) se obtuvo en el tratamiento T2, la mayor producción (25,91 Kg árbol⁻¹) en el tratamiento T1; T3 obtuvo prácticamente la misma producción (25,19 Kg árbol⁻¹) con un peso medio por fruto (192,32 g) y el número de frutos por árbol (130,82), lo que indica que los niveles de agua aplicados no afectaron estos indicadores de rendimiento, en este sentido autores como Hutton y Loveys (2011) y Yang *et al.* (2013) definían que la producción está estrechamente relacionada con el rendimiento y la calidad de frutos, lo que confirma una vez más que aún se puede continuar realizando disminución de la lámina de riego al cultivo en esta fase cuando se trabaje en condiciones similares.

Tabla 3-7 Parámetros de producción de la fruta en los tratamientos T1, T2 y T3

Parámetro	T1	(CV, %)	T2	(CV, %)	T3	(CV, %)	Probabilidad
Peso medio fruto, g	200,20a	13,459	201,59a	10,83	192,32a	6,75	0,727
Producción Kg árbol ⁻¹	25,91a	28,79	24,91a	23,05	25,19a	15,29	0,997
No. frutos árbol ⁻¹	128,13a	19,06	12,94a	32,56	130,82a	12,25	0,492

3.6.2 Parámetros de calidad de la fruta

La restricción de riego realizada en la fase II de crecimiento del fruto no afectó parámetros de calidad tales como: volumen del fruto, % de ácido málico (ATT), °Brix, índice de madurez, firmeza del endocarpio y el mesocarpio, esfericidad del fruto y color Lab. En el contenido de humedad del fruto de los tratamientos deficitarios (T2 y T3) se presentó una ligera diferencia respecto al tratamiento control (T1), mientras que en el peso seco solo se encontró diferencias entre el T2 y el T1 (Tabla 3-8).

El contenido de ácido málico y los °Brix no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, esto puede deberse a la concentración de materia seca no se afectó por un menor suministro de agua, resultados diferentes a los encontrados por Vélez *et al.* (2007a), Cheng *et al.* (2012); Leib *et al.* (2006) y Ma *et al.* (2006); lo que se pudo deber a que trabajaron con otras especies y en otras condiciones de estudio; así mismo, Ningbo *et al.* (2008) aseguran que el efecto del estrés hídrico durante las etapas de crecimiento y maduración de frutos de pera mejora la calidad en términos de aumento de contenido de azúcares y ácidos orgánicos.

Tabla 3-8 Parámetros de calidad de la fruta.

PARAMETRO		T1	(CV, %)	T2	(CV, %)	T3	(CV, %)	Probabilidad
Peso seco (g)		6,85a	22,36	5,76b	17,97	6,22ab	21,28	0,02
Contenido de humedad (CH, %)		75,96a	3,26	73,05b	6,31	72,40b	6,33	0,01
Volumen fruto (cm ³)		182,21a	22,70	178,17a	22,39	182,27a	24,21	0,92
Acidez (% ácido málico)		0,27a	12,05	0,27a	8,67	0,27a	13,41	0,71
°Brix		11,76a	8,65	12,48a	6,42	12,21a	10,29	0,37
Índice de madurez		41,49a	16,09	48,01a	11,36	46,74a	7,22	0,18
Firmeza mesocarpio (N)		7,19a	8,80	7,66a	7,38	7,51a	12,07	0,43
Firmeza endocarpio (N)		15,43a	18,68	17,87a	9,17	17,06a	14,26	0,14
Esfericidad		0,93a	3,91	0,93a	4,56	0,94a	3,39	0,84
Color	L	48,02a	7,93	48,71a	7,65	48,32a	8,07	0,57
	a	-5,94a	68,99	-6,51a	62,81	-6,23a	69,47	0,67
	b	21,04a	12,31	21,79a	13,01	21,09a	11,63	0,37
	IC	-5,41a	67,97	-5,77a	60,22	-5,68a	72,15	0,76

Los valores del porcentaje de ácido málico fueron menores a los encontrado por (Arenas, *et al.* 2012) y mayores a los de (Molina, 2014) mientras que los °Brix obtenidos son mayores a los reportados por (Arenas *et al.*, 2012 y Molina, 2014) para el mismo cultivo, mientras que si fueron muy similares a los encontrados por Yang *et al.* (2013) en *Pyrus. bretschneideri* Rehd con láminas de riego del 60 y 40% de la ETo. También el índice de madurez fue similar al encontrado por Parra *et al.* (2006) en esta misma variedad.

La firmeza en los tratamientos deficitarios fue similar al tratamiento control (T1). Los valores de esfericidad estuvieron cercanos a 1, lo que confirma que la forma de la pera variedad Triunfo de Viena, está muy cercana a una forma redonda en comparación con otras variedades, valores similares fueron encontrados por Molina (2014) y menores por Arenas *et al.* (2012).

Las razones por las cuales la calidad del fruto no se vio afectada por la restricción del riego, puede deberse a que la disminución de la lámina de agua fue moderada o por los mecanismos de la planta para responder ante esta situación de limitación hídrica, tal y como fue informado por Kang y Cai (2002).

Se encontró una correlación significativa ($p < 0,01$) del volumen ($r = 0,844$) con el diámetro ecuatorial del fruto (Figura 3-14). Lo que explica que el fruto no sufre grandes cambios de forma durante su crecimiento.

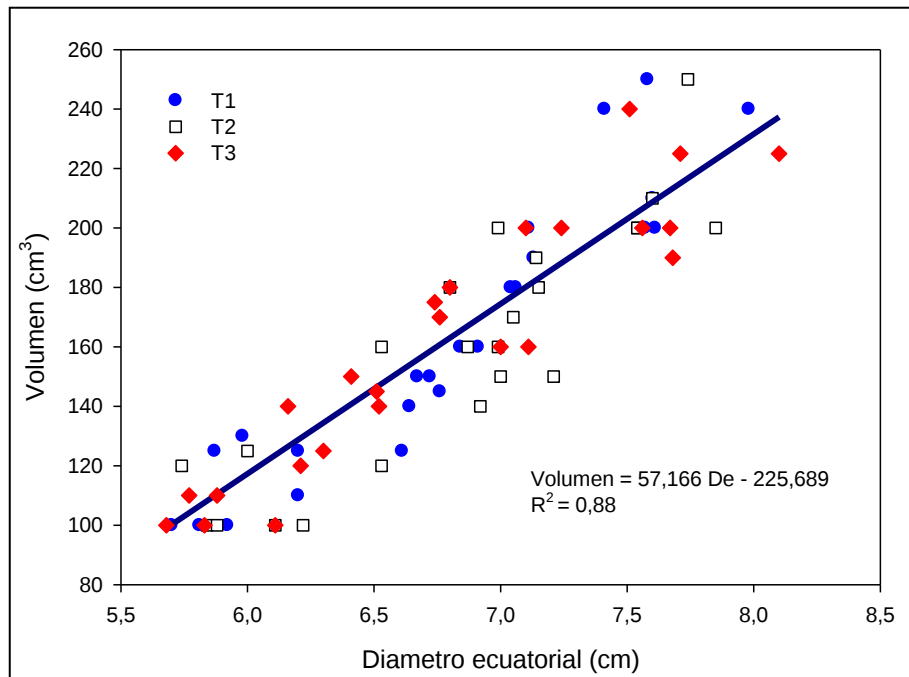


Figura 3-14 Relación del volumen y el diámetro ecuatorial del fruto, determinado en 72 frutos en los tratamientos T1, T2 y T3.

3.6.3 Respiración de frutos

▪ Emisión de CO₂ en la cosecha

La emisión de CO₂ en el momento de la cosecha presentó diferencias significativas entre tratamientos, siendo menores los valores registrados para el tratamiento control (T1) y mayores en los tratamiento deficitarios (T2 y T3). Lo que indica que el RDC afecta la emisión de CO₂ en los frutos al momento de la cosecha, este comportamiento es lógico en condiciones de estrés hídrico para frutos climatéricos como es el caso de la pera.

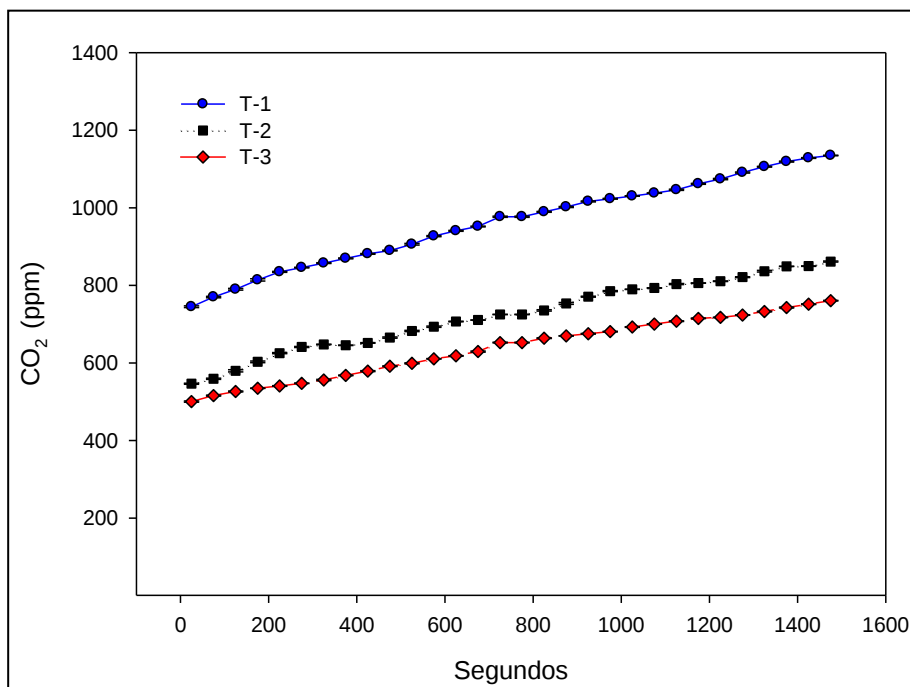


Figura 3-15 Emisión de CO₂ de fruta en los tres tratamientos.

▪ Intensidad respiratoria durante almacenamiento

En la Figura 3-16 se observa el comportamiento de la intensidad respiratoria en almacenamiento, presenta un comportamiento típico de los productos climatéricos como se mencionó anteriormente. En los primeros días de almacenamiento tuvo un comportamiento oscilante llegando al punto máximo (climatérico) a los 16 días de almacenamiento con valores de 25,62; 39,15 y 46,36 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ para T1, T2 y T3 respectivamente, valores similares a los encontrados por Parra *et al.* (2006) en la misma variedad de pera almacenada a una temperatura de 18°C y una humedad relativa de 75%; estos autores encontraron que esta variedad de pera llegaba al climaterio a los 22 días, y que posteriormente comenzaba a descender hasta llegar a la senescencia en el día 24.

El hecho que la intensidad respiratoria fue mayor en los tratamientos deficitarios, indica que el RDC afecta la tasa respiratoria de los frutos en almacenamiento, resultados diferentes fueron encontrados por López *et al.* (2011) quienes concluyeron que el riego deficitario con una lámina de riego del 20% de la ETc en pera 'Conference' no tuvo ningún efecto en la etapa de maduración de fruta en base a la tasa de respiración.

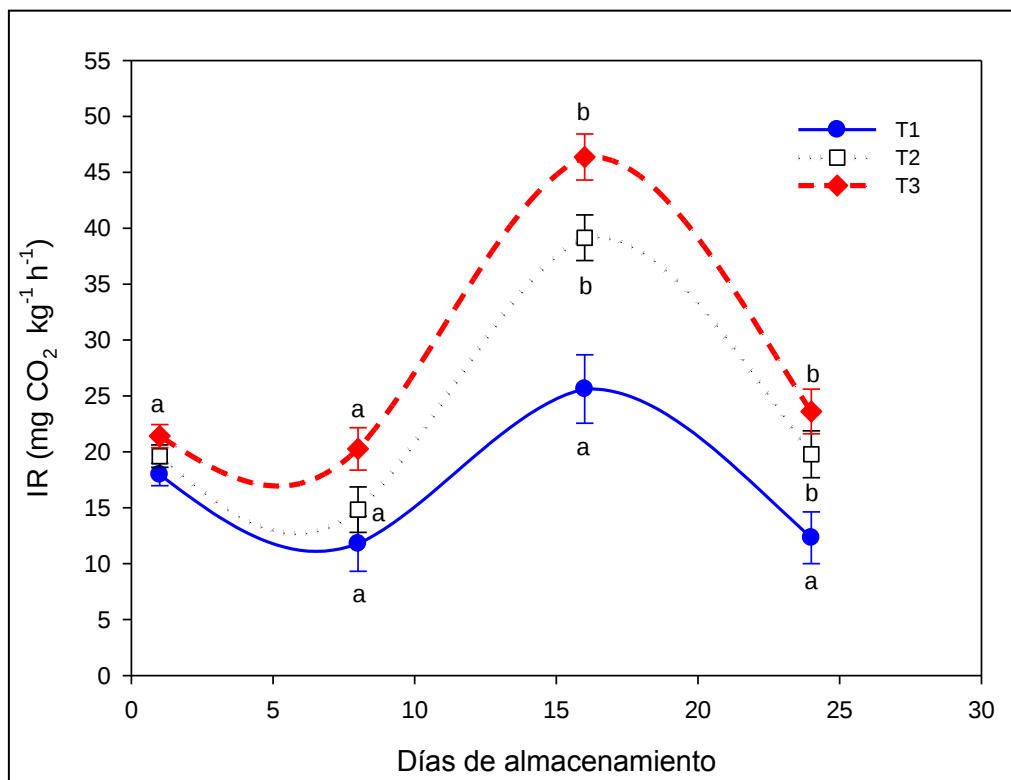


Figura 3-16 Variación media de la IR en almacenamiento en los tres tratamientos.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron arribar a las siguientes conclusiones:

- Durante los meses del estudio la condición hídrica del suelo monitoreada periódicamente mediante lecturas de θ_v y Ψ_s evidenció un comportamiento de acuerdo a las láminas de riego aplicadas.
- El potencial del tallo (Ψ_t) al medio día solar como indicador del estado hídrico de la planta, sugirió que los árboles en los tratamientos de menor riego T2 y T3 se encontraban en condiciones hídricas similares a los árboles que se regaron al 100% de la demanda del cultivo en esta fase fenológica (T1).
- El análisis de los parámetros que se obtuvo de la isoterma presión-volumen mostraron que fue una buena metodología para estudiar los mecanismos de tolerancia del cultivo. Se observó que el pero (*Pyrus communis* L.), no realizó ajuste osmótico ni ajuste elástico en los tratamientos que se redujo la lámina de riego; el contenido hídrico foliar también se mantuvo similar en los tres tratamientos.
- El Contenido Relativo de Agua Apoplástica (CRAa) que se obtuvo en las isotermas presión-volumen mostró que en el tratamiento de menor riego se incrementó este indicador respecto al tratamiento bien regado (T1), lo que se define como un mecanismo de adaptación de *Pyrus communis* L., al estrés hídrico, que justifica en gran medida el buen estado hídrico encontrado en los árboles expuestos a estas condiciones de riego deficitario aplicado (T3).

- El Riego Deficitario Controlado en las condiciones que se desarrolló la investigación, no afectó la fenología del cultivo de Pera, las diferencias de cuajado y pérdida de frutos entre el tratamiento menos regado (T3) y el tratamiento regado según el 100% de la demanda del cultivo (T1) no se consideraron significativas.
- El crecimiento de los frutos expresado por el diámetro ecuatorial y longitud de los mismos, se ajustó a una curva de tipo sigmoideal simple, mediante la cual se determinó la Tasa Absoluta y Tasa Relativa del Crecimiento (TAC y TRC), indicadores que son de gran utilidad en la práctica para predecir y planificar el momento de la cosecha.
- Los tratamientos de menor riego aplicado durante la etapa de crecimiento rápido del fruto, no afectó la producción ni la calidad de la cosecha en términos de tamaño de frutos, rendimiento, firmeza, °Brix, acidez, SST, Índice de madurez, Firmeza Mesocarpio y Endocarpio y la Esfericidad. Mientras que la emisión de CO₂ después de la cosecha y la intensidad respiratoria durante almacenamiento fue mayor en los frutos de las plantas a las que se les disminuyó la lámina de riego, lo que confirma un comportamiento típico de las especies climatéricas cuando se le aplica láminas de riego deficitario.
- Desde el punto de vista, económico, ecológico y ambiental, se demostró los beneficios de la reducción de la lámina de riego para el cultivo del pero en condiciones comerciales, representando en las épocas de sequía un ahorro de agua del 47,15% con sus consecuentes reducciones en ahorros energéticos y otros gastos relacionados con el riego.

4.2 Recomendaciones

Atendiendo a incógnitas encontradas durante el desarrollo de la investigación y no abordadas aun, se recomienda para hacer un uso más eficiente del agua en el cultivo que:

- En futuras investigaciones se evalúen láminas de riego por debajo del 53% de las necesidades hídricas, con el fin de encontrar una lámina de riego mínima que no afecte la calidad y la producción del peral.
- Se profundice en investigaciones relacionadas con el intercambio gaseoso del cultivo, a fin de dilucidar si el peral hace ajuste estomático como mecanismo de evitación al déficit hídrico; y si se expresa un mecanismo de tolerancia que indique la relación de la eficiencia fotosintética (asimilación de CO_2) con aumentos en la economía del agua por esta especie.
- Evaluar otros aspectos de la calidad de la cosecha relacionados con su valor alimentario, específicamente los contenidos de vitaminas, aminoácidos, compuesto flavonoides y contenidos de nutrientes minerales que son indicadores que tienden a modificarse en condiciones medioambientales adversas.
- Realizar estudio del curso diario del estado hídrico del cultivo, incluyendo el potencial hídrico y el potencial de turgencia foliar, para definir el comportamiento del balance hídrico del cultivo durante las horas diurnas y precisar los momentos más sensibles para realizar evaluaciones puntuales.

5. Bibliografía

- Agronet. Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario (2013). En <http://www.agronet.gov.co>; consulta: 15 de octubre de 2014.
- Ahmed, M. (2008). Biodiversity in pears (*Pyrus spp.*): characterization and conservation of germplasm from azad jammu and Kashmir. Tesis de doctorado. Bahauddin Zakariya University. Multan, Pakistan.
- Alonso, M. (2011). Caracterización sensorial y físico-química de manzanas reineta y pera conferencia, figuras de calidad en castilla y león. Tesis de doctorado. Facultad de Veterinaria, Universidad de León. León, España.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. Irrigación and Drainage Paper 56. FAO, Roma.
- Ardila, G., Fischer, G. y Balaguera, H. E. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 5(1), 44-56.
- Arenas, C., Vélez, J. y Camacho, J. (2012). Crecimiento del fruto de peral bajo el sistema de riego por goteo con una y dos líneas. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 6(2), 140-151.
- Arenas, C. (2011). Efecto de la utilización de doble línea de riego por goteo en el cultivo de pera (*Pyrus communis* L.) variedad Triunfo de Viena. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Arévalo, J., Vélez, J. y Camacho, J. (2013). Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero. Engenharia Agrícola e Ambiental 17(8), 811-817.

- Arévalo, J. (2011). Evaluación del efecto de la aplicación de diferentes láminas de riego en el cultivo de Rosa (*Rosa sp*) cv. Freedom, bajo invernadero en la sabana de Bogotá. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Arndt, S., Clifford, S., Wanek, W., Jones, H. y Popp, M. (2001). Physiological and morphological adaptation of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. *Tree Physiology* 21,705-715.
- Azcón-Bieto J. y Talón, M. (1993). Fisiología y Bioquímica Vegetal. Interamericana McGraw-Hill. Barcelona, España.
- Azcón-Bieto J. y Talón, M. (2001). Fundamentos de Fisiología Vegetal. Interamericana McGraw-Hill. Barcelona, España.
- Barceló, C. J., Nicolás, R. G., Sabater, B. y Sánchez, T. R. (1992). Fisiología Vegetal 6ta. Ed Pirámide, S.A. Madrid, España.
- Behboudian, M., Lawes, G. y Griffiths, K. (1994). The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotinia* Rehd). *Scientia Horticulturae* 60, 60-89.
- Bleiholder, G. (1996). Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono y dicotiledóneas cultivadas. 2da Ed. Uwe Meier. Grossbeeren, Alemania.
- Bleiholder, H., Feller, C., Hess, M., Meier, U., Van dan Boom, T., Lancashire, P. y Stauss, R. (2001). Estadios de las plantas mono y dicotyledoneas. BBCH Monografía. *Centro federal de investigaciones biológicas para agricultura y silvicultura*. Uwe Meier. Grossbeeren, Alemania.
- Casierra, F. y Cardozo, M. (2007). Análisis del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero. *Agronomía Colombiana* 25(2), 299-305.
- Chalmers, D. y Van Den Ende, B. (1975). Productivity of peach trees factors affecting dry weight distribution during tree growth. *Annals of Botany* 39(3), 423-432.
- Cheng, F., Sun, H., Shi, H., Zhao, Z., Wang, Q. y Zhang, J. (2012). Effects of related deficit irrigation on the vegetative and generative properties of the pear cultiva 'Yali'. *Journal Agriculture Science* 14, 183-194.

- Collado-González, J., Cruz, Z.N., Medina, S., Mellisho, C.D., Rodríguez, P., Galindo, A., Egea, I., Romojaro, F., Ferreres, F., Torrecillas, A. y Gil-Izquierdo, A. 2014. Effects of water deficit during maturation on amino acids and jujube fruit eating quality. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* 33(1) 105–119 (2014).
- Collado-González, J., Cruz, Z.N., Rodríguez, P., Galindo, A., Díaz-Baños, F.G., García de la Torre, J., Ferreres, F., Medina, S., Torrecillas, A. y Gil-Izquierdo, A. 2013. Effect of water deficit and domestic storage on the procyanidin content, size and aggregation process in pear-jujube (*Z. jujuba*) fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61, 6187–6197.
- Cohen, J., Goldhamer, D., Ferreres, E., Girona, J. y Mata, M. (2001). Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 76, 55-60.
- Cohen, M., Fornaguera, J., Anton, A., Gracia, A. y Ameglío, T. (1996). Biosensores para el riego y la evaluación del estado hídrico de árboles frutales. IRTA. Barcelona, España.
- Conesa, M. R., García-Salinas, M. D., Rosa, J. M., Fernández, J. P., Domingo, R. y Pérez, A. (2014). Effects of deficit irrigation applied during fruit growth period of late mandarin trees on harvest quality, cold storage and subsequent shelf-life. *Scientia Horticulturae* 165, 344-351.
- Corcuera, L., Camarero, J. y Gil, E. (2002). Functional groups in *Quercus* species derived from the analysis of pressure-volume curves. *Trees Structure and Function* 16, 465-472.
- Cruz, Z., Rodríguez, P., Galindo, A., Torrecillas, E., Ondoño, S., Mellisho, D. y Torrecillas, A. (2012). Leaf mechanisms for drought resistance in *Zizyphus jujuba* trees. *Plant Science* 197, 77-83.
- Donoso, S., Peña, K., Pacheco, C., Luna, G. y Aguirre. (2011). Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de Quillaja saponaria y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. *Bosque* 32(2), 187-195.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. (1975). Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Roma.

- FAO. (1999). Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas. Roma.
- FAO. (2011). Escasez y degradación de las tierras y el agua: creciente amenaza para la seguridad alimentaria. Roma.
- FAO 56. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio riego y drenaje No.56.
- Fischer, G. (1994). Crecimiento y desarrollo de los frutales caducifolios. Programa de Posgrado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.
- Galindo, A., Rodríguez, P., Collado-González, J., Cruz, Z.N., Torrecillas, E., Ondoño, S., Corell, M., Moriana, A. y Torrecillas, A. 2014. Rainfall intensifies fruit peel cracking in water stressed pomegranate trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 194, 29-35.
- Galindo, A., Rodríguez, P., Mellisho, C.D., Torrecillas, E., Moriana, A., Cruz, Z.N., Conejero, W., Moreno, F. y Torrecillas, A. 2013. Assessment of discretely measured indicators and maximum daily trunk shrinkage for detecting water stress in pomegranate trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 180, 58-65.
- García, F., Roselló, J. y Santamarina, M. (2001). Iniciación a la fisiología de las plantas. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Garzón C, D. L., Rodríguez O, J. O. y Vélez, J. E. (2013). Efecto del déficit hídrico en el crecimiento y desarrollo de frutos de naranja Valencia (*Citrus sinensis* Osbeck) en el piedemonte del Meta, Colombia. *Acta Agronómica* 62, 136-147.
- Gil, A. (1991). Tratado de arboricultura frutal morfología y fisiología del árbol frutal. Mundi-prensa, Madrid.
- Girona, J., Mata, M., Arbonés, A., Alegre, S., Rufat, J. y Marsal, J. (2003). Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *Journal of the American Society for Horticultural Sciences* 128, 432-440.
- Hernández, E. A. (2010). Importancia del agua para los seres vivos. *Elementalwatson "la"* revista 1, 8-14.

- Hunt, R. (1990). Basic growth analysis. Plant growth analysis for beginners. Unwin Hyman, Boston.
- Hunt, R. (2003). Growth analysis, individual plants. Thomas, B., D.J. Murphy y D. Murray (eds). Encyclopaedia of applied plant sciences. Academic Press, London.
- Hutton, R. y Loveys, B. (2011). A partial root zone drying irrigation strategy for citrus-Effects on water use efficiency and fruit characteristics. *Agricultural Water Management* 98, 1485-1496.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2005). Clasificación de suelos en el departamento de Cundinamarca en asociación con la Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia. Departamento Nacional de Estadística, subdirección de Agrología 169, 325-327.
- Intrigliolo, D., Bonet, L., Nortes, P., Puerto, H., Nicolas, E. y Bartual, J. (2012). Pomegranate trees performance under sustained and regulated deficit irrigation. *Irrigation Science* 31(5), 959-970.
- Jiménez, K. y Gutiérrez, M. (2011). Relaciones hídricas en árboles del bosque tropical seco: el caso de *Enterolobium cyclocarpum*. *Revista forestal mesoamericana Kurú* 8 (20), (1-8).
- Kang, S. y Cai, H. (2002). Theory and practice of partial-rootzone alternative irrigation and deficit irrigation. China Agricultural Press. Beijing.
- Kay, R. (1988). Fruit culture it's science and art. University of California, Davis.
- Kohli, A, Frenken, K. y Spottorno, C. (2012). Disambiguation of water statistics. AQUASTAT Programme, FAO, Roma.
- Leib, B., Capari, H., Andrews, P., Redulla, C., Jabro, J. y Stausz, D. (2006). Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climated. *Irrigation Science* 24(2), 85-99.
- Lin, S., Lin, J., Liu, Q., Ai, Y., Ke, Y., Chen, C. y He, H. (2014). Time course of photosynthesis and non structural carbon compounds in the leaves of tea plants (*Camellia sinensis* L.) in response to deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 144, 98-106.

- Liu, M., Kojima, T., Tanaka, M. y Chen, H. (2001). Effect of soil moisture on plant growth and fruit properties of strawberry. *Acta Horticulturae Sinica* 28(4), 307-311.
- Lopez, G., Larrigaudière, C., Girona, J., MH, B. y Marsal, J. (2011). Fruit thinning in 'Conference' pear grown under deficit irrigation: Implications for fruit quality at harvest and after cold storage. *Scientia Horticulturae* 129, 64-70.
- Luna, W., Estrada, H., Jiménez, J. y Pinzón, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana* 30(4), 343-353 pp.
- Ma, F., Kang, S., Li, F., Wang, M., Pang, X., Wang, J. y Li, Z. (2006). Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear jujube tree in greenhouse. *CSAE* 22(1), 37-43.
- Marsal, J., Lopez, G., Mata, M., y Girona, J. (2012). Postharvest deficit irrigation in 'Conference' pear: Effects on subsequent yield and fruit quality. *Agricultural Water Management* 103, 1-7.
- Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J. y Girona, J. (2002). Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. *European Journal of Agronomy* 17(2), 111-122.
- Martínez, J., Silva, H., Ledent, J. y Pinto, M. (2007). Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 26, 30-38.
- Martínez, J., Silva, H., Ledent, J. y Pinto, M. (2007). Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 26, 30-38.
- Measham, P., Wilson, S., Gracie, A. y Bound, S. (2014). Tree water relations: Flow and fruit. *Agricultural Water Management* 137, 59-67.
- Meier, D., Stauss, R., Streif, J., y Van den Bom, T. (1994). Phänologische Entwicklungsstadien des Kernobstes (*Malus domestica* Bork und *Pyrus communis* L.), des steinobstes (*Prunus*-Arten), der Johannisbeere (*Ribes*-Arten) und der Erdbeere (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 46, 141-153.

- Mellisho, C.D., Egea, I., Galindo, A., Conejero, W., Rodríguez, P., Rodríguez, J., Romojaro, F. y Torrecillas, A. (2012). Pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit response to different deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 114, 30-36.
- Mellisho, C.D., Cruz, Z.N., Conejero, W., Ortuño, M.F. y Rodríguez, P. (2011). Mechanisms for drought resistance in early maturing cvar Flordastar peach trees. *Journal of Agricultural Science* 149(5), 609-616.
- Miranda, D., Fischer, G. y Carranza, C. (2013). "Clasificación botánica y morfología de manzano, peral, duraznero y ciruelo". En: Los frutales caducifolios en Colombia. Sociedad Colombiana de Ciencias Frutícolas, Bogotá.
- Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials (Vol. 1). Gordon and Breach Science Publisher, New York.
- Molina, J. (2014). Efecto de la aplicación de tres láminas de riego en un cultivo de pera variedad Triunfo de Viena (*Pyrus communis* L.). Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Morandi, B., Losciale, P., Manfrini, L., Zibordi, M., Anconelli, S., Galli, F. y Corelli, L. (2014). Increase in water stress negatively affects pear fruit growth by reducing first its xylem and then its phloem inflow. *Journal of Plant Physiology* 171, 106-113.
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 2(27), 179-191.
- Muñoz, V. (2005). Respuesta de la variación del diámetro de tronco y del potencial hídrico xilemático a diferentes regímenes de riego en uva de mesa, cv. Crimson Seedless. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Myers, B. J. (1988). Water stress integral-a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiology* 4, 315-323.
- Naor, A., Hupert, H., Greenblat, Y., Peres, M., A. K. y I. K. (2001). The response of nectarine fruit size and midday stem water potential to irrigation level in stage III and crop load. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 126, 140-143.
- Ningbo, C., Taisheng, D., Fusheng, L., Ling, T., Shaozhong, K., Mixia, W. y Zhijun, L. (2009). Response of vegetative growth and fruit development to regulated deficit

- irrigation at different growth stages of pear-jujube tree. *Agricultural Water Management* 96, 1237-1246.
- Ningbo, C., Taisheng, D., Shaozhong, K., Fusheng, L., Jianhua, Z., Mixia, W. y Zhijun, L. (2008). Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees. *Agricultural Water Management* 95, 489-497.
- Ortiz, M. (2006). Respuestas fisiológicas y bioquímicas de dos especies de pinos en condiciones limitantes de humedad. Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México.
- Osorio, F. y Gravina, A. (2008). Inducción floral en frutales de hoja caduca. Curso de fisiología de cultivos - modulo frutales. Universidad de la República. Facultad de Agronomía, Montevideo.
- Parra, A. (1997). Diseño de la metodología para la determinación de las características físicas y fisiológicas necesarias para el adecuado manejo cosecha y poscosecha de pera dentro del municipio de Nuevo Colón. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Parra, A. y Hernández, E. (2000). Manejo poscosecha de la pera variedad Triunfo de Viena. Cartilla divulgativa. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Parra, A., Hernández, E. y Camacho, J. (2006). Comportamiento fisiológico de la pera variedad Triunfo de Viena (*Pyrus communis* L.) durante el periodo de poscosecha. *Revista Brasileira de Fruticultura* 28(1), 46-50.
- Parra, R., Robinson, T., Osborne, J. y Parra-Bujanda, L. (2008). Efecto de carga de fruto y déficit hídrico en la calidad y producción de manzana. *Revista Chapingo, serie Horticultura* 14, 49-54.
- Patakas, A., y Noitsakis, B. (1999). Mechanisms involved in diurnal changes of osmotic potential in grapevines drought conditions. *J. Plant Physiol*, 154, 767-774.
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, L., Alarcón, J. y Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture - Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management* 97(9), 1233-1241.

- Pedrero, F., Maestre, J., Mounzer, O., Alarcón, J., y Nicolás, E. (2014). Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 146, 228-237.
- Pierantozzi, P., Tones, M., Bodoira, R. y Maestri, D. (2013). Water relations, biochemical physiological and yield responses of olive trees (*Olea europaea* L. cvs. *Arbeguina* and *Manzanilla*) under drought stress during the pre flowering and flowering period. *Agricultural Water Management* 125, 13-25.
- Polanía, J., Mejía de T, S. y Rodríguez, A. (2003). Curva Presión Volumen de la caña de azúcar variedad CC 8592 en condiciones del Valle del Cauca. *Acta Agronómica* 52(1-4), 71-76.
- Rodríguez, A. B. (2009). Influencia de la temperatura del aire y del raleo sobre el tamaño del fruto de peral (*Pyrus communis* L.) cv. William's durante sus distintas fases de desarrollo. Tesis de maestría. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Cordoba.
- Rodríguez, P., Mellisho, C., Conejero, W., Cruz, Z., Ortuño, M., Galindo, A. y Torrecillas, A. (2012). Plant water relations of leaves of pomegranate trees under different irrigation conditions. *Environmental and Experimental Botany* 77, 19-24.
- SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación). (2014). Sistema de riego localizado (goteo-microaspersión). Mexico.
- Salisbury, F. y Ross, C. (2000). Fisiología de las plantas. Células: agua, soluciones y superficies. Ed. Paraninfo Thomson Learning. Madrid.
- Sánchez Q, A. S. (14 de noviembre de 2013). La importancia del agua en la agricultura. El Universo. Recuperado de <http://www.eluniverso.com>, Guayaquil.
- Savé, R., Biel, C., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M. C. y Torrecillas, A. (1995). Some physiological and morphological characteristics of citrus plants for drought resistance. *Plant Science* 110, 167-172.
- Scholander, P., Hammel, H. T., Bradstreet, E. y Hemmingsen, E. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* 158, 339-346.

- Serrano, L. y Peñuelas, J. (2005). Contribution of physiological and morphological adjustments to drought resistance in two editerranean tree species. *Biologia Plantarum* 49(4), 551-559.
- Sozzi, G. (2007). Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento en: Fisiología del crecimiento de los frutos en árboles frutales. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires 309-328.
- Stajanko, D., Rozman, C., Pavlovic, M., Beber, M., y Zadavec, P. (2013). Modelin of 'Gala' apple fruits diameter for improving the accuracy of early yield prediction. *Scientia Horticulturae* 160, 306-312.
- Torrecillas, A. (2011). Importancia del Agua. Aspectos ecofisiológicos. Catedra Internacional de automatización y control en sistemas de producción agropecuaria. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Torrecillas, A., Alarcón, J., Domingo, R., Planes, J. y Sánchez, M. (1996). Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. *Plant Science* 118, 135-143.
- Turner, N. (1986). Crop water deficits: A decade of progress. *Advances in Agronomy* 39, 1-51.
- Vélez, J. (2005). Programación de riego en citricos en base de sensores de medida del estado hídrico del suelo y de la planta. Tesis de Doctorado. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.
- Vélez, J., Intrigliolo, D. y Castel, J. (2007a). Programación del riego deficitario en Clementina de Nules, mediante dendrómetros. *International of Citrus* 38, 313-317.
- Vélez, J., Intrigliolo, D. y Castel, J. (2007b). Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximun daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90(3), 197-204.
- Vélez, J., Intrigliolo, D. y Castel, J. (2011). Programación de riego en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y de la planta. *Revista Cientifica Actualidad y Divulgación Cientifica U.D.C.A*, 14(2), 65-73.
- Verreynne, J., Rabe, E. y Theron, K. (2001). The effect of combined deficit irrigation and summer trunk girdling on the internal fruit quality of 'Marisol' Clementines. *Scientia Horticulturae* 91, 25-37.

- Vila, H. F. (2011). Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid. Modelo vs. Experimento. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Cuy, Mendoza, Argentina.
- Vivas, A., Prieto, M., Moreno, V., Samperio, A. y Moñino, M. (2011). Respuesta productiva a largo plazo de la aplicación de riego deficitario controlado en peral variedad Ercolini. *Fruticultura* 14, 22-28.
- Yang, W., Zhi, Z., Wei, W., Yingjie, M. y Xingfa, H. (2013). Yield and growth of mature pear trees under water deficit during slow fruit growth stages in sparse planting orchard. *Scientia Horticulturae* 164, 189-195.
- Yuri, J., González, J., Verdugo, A. y Del Pozo, A. (2011). Responses of fruit growth, quality, and productivity to crop load in apple cv. Ultra Red Gala/MM111. *Scientia Horticulturae* 127, 305-312.
- Zonia, L. y Munnik, T. (2007). Life under pressure: hydrostatic pressure in cell growth and function. *Trends in Plant Science* 12(3), 90-97.