

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIBRACIÓN ELECTRÓNICA DE FRUTOS A NIVEL DE CAMPO,
EN MANZANO (*Malus domestica* Borkh.) Cv. 'ROYAL GALA'**

por

José Luis ÁLVAREZ AGOSTINI

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2021**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. MSc. Vivian Severino

Ing. Agr. Dr. Mercedes Arias

Ing. Agr. MSc. Alejandra Borges

Fecha: 23 de abril de 2021.

Autor:

José Luis Álvarez Agostini

AGRADECIMIENTOS

A los productores del proyecto CSIC, AFRUPI y +Tecnología por su apoyo, en especial a Samuel Ferrando por la disposición y el interés al hacer posible la evaluación en su campo.

A Danilo Cabrera y al equipo de INIA por su disposición en todo momento.

A Alejandra Borges, por su apoyo en el área estadística.

A Sully Toledo por su ayuda en las revisiones del texto.

Un especial agradecimiento a mis compañeros de trabajo del grupo de ecofisiología de frutales. En especial a Matías De Iacovo, Ramiro Tachini y Marcia García que colaboraron en las mediciones de campo y en una cantidad de buenos momentos compartidos.

A Vivian Severino y Mercedes Arias, madres de mi profesión frutícola. No solo tutoras de este trabajo, sino también compañeras y buenas consejeras de la vida.

Por último, agradecer a los que siempre estuvieron presentes, a mi familia y amigos por su apoyo en todo momento.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. <u>Objetivo general</u>	2
1.1.2. <u>Objetivos específicos</u>	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. IMPORTANCIA DEL CULTIVO A NIVEL MUNDIAL.....	3
2.2. PRODUCCIÓN DE MANZANAS EN URUGUAY.....	3
2.3. EL FRUTO Y SU CRECIMIENTO.....	5
2.3.1. <u>Fases de crecimiento</u>	5
2.3.2. <u>Factores determinantes del crecimiento</u>	5
2.4. MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE FRUTO.....	6
2.5. CURVA DE CRECIMIENTO DEL FRUTO.....	8
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	11
3.1. UBICACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL.....	11
3.2. MATERIAL VEGETAL Y CARACTERÍSTICAS DEL PREDIO.....	11
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA EVALUACIÓN.....	11
3.4. VARIABLES A MEDIR.....	14
3.4.1. <u>Diámetro de fruto</u>	14
3.5. CONSTRUCCIÓN DEL CALIBRE.....	15
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	17
4.1. DISEÑO DE HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN.....	17
4.2. CALIBRE MANUAL.....	17
4.2.1. <u>Curva de crecimiento</u>	17
4.2.2. <u>Distribución</u>	19
4.3. CALIBRE FIJO.....	20

4.3.1. <u>Curva de crecimiento</u>	20
4.3.2. <u>Tasa de crecimiento relativo</u>	22
4.3.3. <u>Diferencias entre el día y la noche</u>	24
4.4. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS.....	25
5. <u>CONCLUSIONES</u>	30
5.1. HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN	30
5.2. EVOLUCIÓN DE CRECIMIENTO DE FRUTOS	30
5.3. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS.....	31
6. <u>RESUMEN</u>	32
7. <u>SUMMARY</u>	33
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	34

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Número de plantas caducas totales y con riego, según especie, 2014/2015	4
2. Número de plantas totales y en producción, producción y rendimientos de manzana, por zafra	4
3. Fechas de evaluación con calibre manual	14

Figura No.	
1. Calibre fijo o dendrómetro	12
2. Calibre manual con datalogger utilizado en el campo	13
3. Comparación esquemática de ambas metodologías	13
4. Diámetro de frutos obtenidos con calibre manual según DDPF	18
5. Curva de crecimiento del fruto tipo Mitscherlich en función de los DDPF, para calibre manual	19
6. Distribución normal de calibres a los 46 DDPF	20
7. Curva de crecimiento del fruto en función de DDPF, obtenida con calibre fijo.....	21
8. Curva de crecimiento del fruto tipo Mitscherlich en función de los DDPF, para calibre fijo	22
9. Tasa de crecimiento relativo y crecimiento del fruto en función de los DDPF	23
10. Análisis de regresión entre TCR y temperatura promedio diaria (°C).....	24
11. Tasa de crecimiento relativo (%) según momento del día	25
12. Modelo GAM. Diámetro del fruto en función de DDPF	26
13. Modelo GAM. Diámetro del fruto en función de los DDPF, con intervalos de confianza	27
14. Diámetro del fruto predicho por modelo vs. diámetro calibre continuo	28

1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura actual se está llevando a cabo una revolución con la información, comunicación y automatización de las distintas cadenas de producción. Dependiendo del punto de vista con el que se le analicen, estos cambios incrementan la eficiencia de producción y contribuyen a la alta demanda de alimentos a nivel mundial, por otro lado, pueden generar un desequilibrio social si se piensa en la cantidad de puestos de trabajo que se pierden al sustituir tareas realizadas por el ser humano. Las ventajas y desventajas del desarrollo o adaptación de tecnología se deben evaluar por las consecuencias en las que se pueda incurrir, ejemplo de ello es la crisis medioambiental producto de la implementación de tecnología que muchas veces parece no tener un criterio agronómico, sino comercial. Se deben mejorar las condiciones de trabajo para el hombre, pero no se puede sustituir al propio hombre. Estas cuestiones deben plantearse en la introducción, previo a los objetivos, antes de plantear una metodología o de generar tecnología e implementarla (Zambon, 2019).

Dentro de los productos agropecuarios que exporta Uruguay se encuentran las manzanas, una de las principales frutas de producción nacional que provienen de un sistema de producción intensivo donde el recurso humano y tecnológico es fundamental para obtener un producto de calidad. En la última década se ha realizado un esfuerzo importante por parte de instituciones públicas y privadas, en conjunto con empresas y productores, para que el cultivo de manzano se oriente cada vez más hacia la exportación de fruta fresca, dadas las posibilidades que ofrecen las características climáticas, productivas y sociales que definen el cultivo. De todas formas, resulta clave identificar las limitantes e incrementar la eficiencia de producción junto con la calidad del producto mediante la actualización de determinadas medidas de manejo y la incorporación o el desarrollo de nuevas tecnologías para que el sector prospere (Tachini y De Iacovo, 2018).

Uno de los puntos es que, para lograr tener éxito en algunas decisiones agronómicas se debe conocer en qué etapa del proceso de crecimiento se encuentra el fruto. El presente trabajo aborda el desarrollo y la evaluación de la calibración electrónica de fruta en el campo, una herramienta tecnológica de gestión que genera información precisa y detallada sobre el crecimiento y desarrollo del fruto, muy útil en la determinación de las medidas de manejo que afectan el tamaño de fruto, y para la comercialización del producto. El tamaño es reconocido como un atributo de calidad por los consumidores y contribuye en el rendimiento final, por el incremento en el peso. Sin embargo, en Uruguay el seguimiento del tamaño del fruto no es una práctica común en los cultivos comerciales de manzano y cuando se realiza, generalmente se hace de forma manual con muestras pequeñas de algunos cuadros, limitándose habitualmente su implementación para definir el momento oportuno de raleo, principalmente por los altos costos o la baja disponibilidad en mano de obra para esta tarea. Si bien existen registradores automáticos instalables en un fruto capaces de hacer este trabajo, estos no

están diseñados para esta tarea, son muy costosos como para aplicarlos masivamente en cultivos comerciales y se limitan a situaciones experimentales.

El registro del tamaño y la predicción del tamaño final a través de un seguimiento sistemático durante el ciclo, ha sido reportado para el cultivo de cítricos por Severino (2003) y retomado como temática en este trabajo en el año 2016 para el cultivo de manzana.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Desarrollar la metodología de calibración electrónica continua del fruto y compararla con la metodología de calibración digital manual.

1.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar una herramienta de calibración.
- Evaluar el crecimiento de frutos utilizando la herramienta diseñada.
- Evaluar el crecimiento de frutos mediante calibración manual.
- Comparar ambas metodologías de calibración.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPORTANCIA DEL CULTIVO A NIVEL MUNDIAL

Los manzanos son de los frutales de hoja caduca más plantados a nivel mundial, cada año se producen más de 75 millones de toneladas en poco menos de cinco millones de hectáreas (FAO, 2013). Su producción ha tenido un notorio crecimiento en las últimas décadas asociado con la aparición de las manzanas bicolors dentro de las que se destacan los grupos Gala, Fuji y Cripps Pink, que por sus cualidades tienen buen potencial exportador (Barriga, 2003).

La producción mundial de manzanas en el año 2013 fue de 80.822.521 toneladas. China es el país que ocupa el primer lugar del mundo destinando al cultivo más de dos millones de hectáreas y produciendo aproximadamente 36 millones de toneladas al año. Asia representa el 64% de la producción mundial. En segundo lugar, se encuentra Europa con un 20% de la producción mundial, siendo en los países de la Unión Europea donde se registran los mayores rendimientos por unidad de superficie. Lo siguen en importancia, América del Norte con 6% de la producción, América del Sur con el 5%, África con el 3% y por último Oceanía y América Central con menos del 1% cada uno (FAO, 2013). La principal variedad producida por China es Fuji con un 70%, le siguen Gala, Quinguan, Red Delicious y Golden Delicious sobre una superficie aproximada de 2,3 millones de hectáreas. En la Unión Europea las principales variedades son Golden Delicious, Gala, Idared y Jonagold respectivamente, mientras que en América del Sur el principal productor es Chile, con las variedades Gala, Cripps Pink, Red Delicious y Granny Smith (FAO, 2013).

2.2. PRODUCCIÓN DE MANZANAS EN URUGUAY

En Uruguay el cultivo de manzanas es el más importante dentro de las especies caducas, la implementación del riego en el cultivo tiene un rol fundamental en el cuajado y crecimiento del fruto (ver cuadro No. 1) a pesar de ello, no se tiene la totalidad del cultivo con riego.

Cuadro No. 1. Número de plantas caducas totales y con riego, según especie, 2014/2015

Especie	Número de plantas caducas		
	Totales (miles)	Riego	
		(miles)	(% /total)
Total	5.162	3.449	67
Manzana	2.885	2.180	76
Pera	581	429	74
Nectarino	144	85	59
Durazno	1.188	636	53
Ciruela	224	93	42
Membrillo	140	26	18

Fuente: MGAP. DIEA (2016).

Entre las zafras 06/07-14/15 se ha producido una disminución de 13.3% en el número de plantas, esta reducción se debe principalmente a plantas improductivas junto con un recambio varietal. Teniendo en cuenta esos cambios los volúmenes producidos y el rendimiento son relativamente constantes (ver cuadro No. 2). En cuanto a variedades, la más plantada es Red Chief con el 46% de la superficie, siendo Gala un 21.6% y Cripps Pink un 14.7% para la zafra 14/15 (MGAP. DIEA 2012, 2012b, 2016, Observatorio Granjero 2018).

Cuadro No. 2. Número de plantas totales y en producción, producción y rendimientos de manzana, por zafra

	06/07	07/08	08/09	09/10	11/12	12/13	13/14	14/15
Plantas totales (miles)	3.328	3.417	3.329	3.342	3.303	3.326	2.945	2.885
Plantas en producción (miles)	2.797	3.002	2.974	3.120	3.067	2.950	2.644	2.652
Producción (ton)	66.874	51.266	58.775	52.226	50.271	45.626	52.762	55.454
Rendimiento (kg/pl)	24	17	20	17	16	15	20	21

Fuente: MGAP. DIEA (2016).

2.3. EL FRUTO Y SU CRECIMIENTO

En términos botánicos, Agustí (2008) define que con la evolución las semillas se han asociado en muchos casos a otros órganos de la planta formando unidades complejas de diseminación, constituyendo los frutos. Cuando en su formación intervienen de modo decisivo órganos auxiliares, extracarpelares, reciben el nombre de falsos frutos, como es el caso de la manzana. El proceso comienza tras la fecundación o el estímulo partenocárpico del ovario y su desarrollo continúa hasta convertirse en fruto maduro. Esta transición tiene lugar en tres fases sucesivas, con características bien definidas, pero variables en duración según las condiciones ambientales y las variedades.

2.3.1. Fases de crecimiento

Según Agustí (2008) durante las 2-10 semanas siguientes a la antesis, dependiendo de especie y variedad transcurre la fase I del crecimiento del fruto, durante esta etapa predomina la división celular dando lugar a una curva exponencial. En el manzano, esta etapa es crucial para determinar el tamaño potencial del fruto (Sepúlveda, 2010). Culminada la fase de división celular comienza la fase II, en la que predomina la expansión y engrosamiento celular que se ve acompañado de la degradación de pectina, formando una gran cantidad de espacios aéreos intercelulares produciendo un descenso en la densidad del fruto. La fase III se corresponde principalmente con los procesos asociados a la culminación del crecimiento y maduración del fruto (Yuri et al., 2005).

2.3.2. Factores determinantes del crecimiento

Las evaluaciones de crecimiento proporcionan una medida de la respuesta del cultivo a factores ambientales como la temperatura o el estado hídrico, las medidas de manejo o el estado de la planta. Son muchos los factores que intervienen en el crecimiento del fruto, pero algunos suelen ser determinantes.

Entre los factores más influyentes interviene el potencial hídrico, este suele explicar los cambios diurnos y nocturnos mediante la expansión y contracción del fruto (Higgs y Jones 1984, Grange y Andrews 1994, Sozzi 2007, Steduto et al. 2012). Lee (1990) sostiene que las variaciones diarias en el tamaño del fruto pueden ser explicadas por el flujo diario de savia que recibe de la planta y por las pérdidas de agua y carbono producto de la transpiración y respiración.

Otro factor ambiental importante es la temperatura, esta determina de cierta forma la variabilidad en cosecha porque condiciona la brotación y floración de los frutales con requerimientos de frío (Erez, 1994). Se ha demostrado una correlación positiva entre el incremento de temperatura inmediatamente después de la floración, con

el cuajado y el tamaño final del fruto (Sepúlveda, 2010). Las temperaturas más cálidas de la noche generalmente aceleran el incremento de tamaño de los frutos y pueden influir en la forma de la fruta, el crecimiento vegetativo, la floración y el período de crecimiento del embrión (Tukey 1960, Berg 1990, Austin et al. 1999, Warrington et al. 1999, Yuri et al. 2005). Se utiliza como temperatura base para el crecimiento del fruto 10°C en manzanos (Warrington 1999, Stanley et al. 2000, Lötze 2004).

Agustí (2008), Yuri et al. (2011a), Steduto et al. (2012) atribuyen gran importancia al crecimiento y desarrollo del fruto en pomáceas a la presencia de semillas. En las semillas en formación se ha demostrado una elevada capacidad de síntesis hormonal (giberelinas, citoquininas y auxinas), responsables del crecimiento de los tejidos adyacentes. Este fenómeno se evaluó en las drupas, pomáceas y cítricos realizando experimentos comparativos entre frutos con y sin semillas, donde sugieren que la síntesis hormonal tiene lugar en los óvulos fertilizados.

2.4. MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE FRUTO

En muchos cultivos de frutas, el alto número de frutos pequeños pueden volver inviable económicamente el sustento de la explotación (Tronstad 1995, Ortega et al. 2002). Como consecuencia del papel clave del tamaño del fruto, se realizan extensos esfuerzos en investigación con el fin de desarrollar estrategias, tanto genéticas como culturales, para regularlo. Esta revisión se esfuerza por identificar los diversos índices de crecimiento y desarrollo de frutas resumiendo metodologías clásicas y modernas para su medición y análisis.

En el cultivo de manzano la variable utilizada con más frecuencia para medir el crecimiento del fruto es el diámetro ecuatorial. Esto se debe a las características de crecimiento de la manzana donde predomina el diámetro, si se estudia el crecimiento del pepino, la variable más importante es la evolución del largo, según el estudio realizado por Shapendonk y Brouner (1984).

Existen técnicas destructivas y no destructivas para las mediciones del crecimiento del fruto, las mediciones básicas son la masa total (fresca o seca) y el tamaño (longitud, diámetro o combinados). En algunos estudios de crecimiento, estas medidas básicas se convierten a menudo en unidades derivadas de crecimiento para evaluar el área, el volumen, la forma, la densidad o el rendimiento del cultivo (Radford 1967, Beadle 1993). Autores como Stanley et al. (2000), Yuri et al. (2005) expresan el crecimiento del fruto en términos de incrementos de peso ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), para ello realizan la curva de crecimiento implementando un método destructivo, cosechando y pesando frutos. El uso del peso total en el análisis del crecimiento supone que el aumento de materia seca es el resultado de la actividad fotosintética neta de toda la planta. Aunque el peso seco se utiliza comúnmente en el análisis del crecimiento para reflejar la cantidad real de material orgánico sintetizado por la planta u órgano, no todo es producto de la

fotosíntesis, se producen cambios en el peso seco debido a la movilización de reservas hacia el material en estudio (Wareing y Phillips, 1970). A partir de los cambios bioquímicos en las frutas se generan índices de crecimiento, como las relaciones en concentración de hormonas, debido a que las variaciones en la concentración de algunas de estas sustancias están generalmente correlacionadas con el crecimiento de los frutos (McKee et al. 1955, Schenk 1961).

Algunos investigadores han utilizado el término de medición “no destructiva” al medir el volumen y las dimensiones de la fruta cosechada, a partir de las cuales se desarrollaron las correlaciones estadísticas para predecir otros atributos de crecimiento como el peso (Marcelis, 1992). La medición continua o periódica del mismo fruto en crecimiento mediante calibres deja prácticamente intactos los frutos. Esta metodología no destructiva consiste en seleccionar aleatoriamente una muestra de fruta que se puede etiquetar o no y medir manualmente el diámetro y/o la longitud del fruto en posiciones definidas para cada fruta con un calibrador (Gustafson 1927, Schapendonk y Brouwer 1984, Tazuke y Sakiyama 1984, Opara 1993, Nerd y Mizrahi 1998, Worrell et al. 1998). A partir de los datos de volumen o dimensiones, se puede estimar la masa fresca de fruta mediante una ecuación de regresión (Schapendonk y Brouwer 1984, Tazuke y Sakiyama 1984). Según Tukey (1960), Díaz-Pérez y Shackel (1991) en la implementación de mediciones no destructivas, independientemente de la técnica utilizada, el intervalo de tiempo durante el periodo en que se recogen y/o se mide debe ser estandarizado para minimizar los errores que puedan surgir debido a las fluctuaciones en el crecimiento de los frutos.

Alternativamente, para medir el crecimiento y las dimensiones se pueden usar sensores unidos al fruto (Higgs 1984, Lang y Thorpe 1989, Lang 1990), sin contacto con el fruto utilizando láser (Eguchi, 2007), o unidos al tallo (Klepper 1971, Peter 1985, Link 1998, Köcher 2012). Se ha medido el diámetro del fruto de tomate en crecimiento usando calibradores electrónicos, las mediciones no destructivas de este tipo, que no dañan y mantienen el fruto proporcionan información detallada sobre el crecimiento de la fruta de tal manera que se puede cuantificar el efecto de eventos importantes en el desarrollo (Johnson et al., 1992). El volumen de la fruta se puede medir por desplazamiento de agua (Gustafson 1926, Higgs y Jones 1984, Tazuke y Sakiyama 1984, Struik et al. 1988, Magein 1989, Johnson et al. 1992) o midiendo la fuerza de flotación en un fruto sumergido en un fluido basado en el principio de Arquímedes (Lang y Thorpe 1989, Lang 1990). Las técnicas fotográficas también se han utilizado para medir el crecimiento de los frutos. Erickson (1976), Wehner y Saltveit (1983), Aggelopoulou (2011) estimaron el crecimiento del fruto y el rendimiento analizando imágenes tomadas con cámaras fotográficas, si bien se obtiene una alta correlación por parte del software reconociendo los frutos, la desventaja de esta tecnología es la imprecisión en la medición a campo, principalmente por los obstáculos que genera la propia planta (hojas, ramas y frutos) y por las variaciones lumínicas del campo que subestiman el número de frutos en el monte.

Cuando se realizan mediciones, independientemente de la técnica utilizada, se le suele asociar a la medida un patrón cronológico que ayuda a describir la evolución. Estos pueden basarse en los días posteriores a plena floración (DDPF), la anthesis, la caída de los pétalos, los grados día, la fecha calendario o el tiempo transcurrido después de la polinización o un tratamiento específico. Debe tenerse en cuenta que utilizar esta cronología fisiológica puede variar considerablemente de un año a otro, por ejemplo, la fecha de plena floración (Weinberger, 1948). El hecho de que la determinación sea algo subjetiva introduce una variabilidad inherente en la caracterización cronológica de los sucesivos eventos de desarrollo (Fischer, 1962). En su forma más simple, un modelo funcional empírico del crecimiento de la fruta consiste en relacionar el tamaño con el tiempo (Hughes y Freeman 1967, Hunt 1978). También puede relacionarse el crecimiento del fruto con el clima, a través de los grados día, tomando como temperatura base para el manzano 10°C (GD10, Stanley et al., 2000). La acumulación de calor es un buen índice ambiental para el crecimiento de las frutas, según Stanley et al. (2000), Lötze (2004) es particularmente aplicable en las primeras etapas del desarrollo (Fischer 1962, Batjer y Martin 1965, Topp y Sherman 1989). Este índice es objetivo y se basa en un parámetro mensurable de temperatura, además tiene efectos cuantitativos sobre el crecimiento y el desarrollo del fruto (Yuri et al., 2005).

De las curvas de crecimiento surge la tasa de crecimiento ligada al transcurso de una unidad fenológica o al tiempo. Existen diferencias en su forma de expresión en estudios de crecimiento de frutos, a través del diámetro y la masa está reportada la utilización la tasa de crecimiento relativa (TCR) sugerida por West et al. (1920) y la tasa de crecimiento absoluta (TCA) que se suele implementar con registros de peso del fruto (Fisher 1921, Lee 1990, Opara 1993, Yuri et al. 2005).

2.5. CURVA DE CRECIMIENTO DEL FRUTO

Una vez que se tienen las mediciones del fruto, lo siguiente suele ser modelar su crecimiento o incluso como lo describe claramente de forma teórica Agustí (2005), llegar a identificar sus fases o estadios. Está reportado por numerosos autores con enfoque matemático o estadístico, que el fruto del manzano describe una curva de crecimiento de tipo sigmoide con tres fases durante su período de crecimiento y desarrollo. En esta curva el fruto exhibe una fase rápida de crecimiento exponencial en las etapas anteriores hasta que se alcanza una velocidad máxima, seguida de una etapa con crecimientos decrecientes hasta que el fruto esté completamente maduro (Leopold 1964, Marcelis y Hofman-Eijer 1995, Agustí 2008). Volz (1991) mostró que esta primera fase sólo duró hasta 40-45 DDPF para Granny Smith y 60-70 DDPF para Royal Gala. Para la mayoría de los frutos con crecimiento sigmoidal, el patrón de crecimiento que sigue el peso fresco de los frutos es similar al de longitud y diámetro, aunque el período durante el que se produce el aumento máximo del peso fresco a menudo es

precedido por la obtención de dimensiones máximas (Calegario et al. 1997, Yuri et al. 2005). Sin embargo, algunos no están de acuerdo con esta postura y afirman que el crecimiento no sigue el comportamiento sigmoide. Para Pearson y Robertson (1956), Lotter et al. (1985), Hussein y Slack (1994) el crecimiento de las manzanas midiendo diámetro y longitud del fruto no siguió patrón de tipo sigmoide. Afecta la curva si los intervalos de medición son distintos y la metodología de medición (Ryugo 1988, Magein 1989, Opara 1993, Calegario et al. 1997, Worrell et al. 1998). Omitir una proporción del tiempo durante el periodo de crecimiento, podría dar lugar a una curva de crecimiento lineal o exponencial, como en el estudio sobre el crecimiento de manzana Gala a partir de los 45 días DDPF, Opara (1993) obtuvo una curva de crecimiento exponencial para el diámetro del fruto, mientras que el peso fue sigmoidal. Lakso et al. (1995) propusieron el modelo de crecimiento expolineal de Gourdrian y Monteith (1990) como un nuevo modelo para el patrón de crecimiento inherente al fruto de la manzana y que incluso se ajusta para dos variedades con distinta tasa de crecimiento. Takishita et al. (1993) analizaron el crecimiento de varios cultivares de manzana en Japón usando el modelo Geompertz con la curva logística clásica simple. Encontraron que la curva Gompertz era adecuada a lo largo de la fase inicial de crecimiento, sin embargo, la curva logística fue más adecuada que la curva de Gompertz entre mediados de julio de su país y la época de cosecha. Welte (1990) implementó un complejo modelo de simulación dinámica diferencial para predecir el tamaño final del fruto de manzana que incluía efectos sobre la tasa de crecimiento de ciertos rangos de temperatura, efectos de duración del día, efectos de la carga de los cultivos y otros factores empíricos. El modelo fue efectivo para ajustar empíricamente las variaciones anuales de la curva de crecimiento. De Silva et al. (1997b) investigaron la posibilidad de predecir las distribuciones de diámetro de la manzana cv. Gala a principios de la temporada de crecimiento ajustando las distribuciones a los tamaños de los frutos. Según lo reportado por Elías y Causton (1976) si se parte de una población con menor variabilidad en la distribución de frutos se puede ajustar la curva de crecimiento a un polinomio de menor grado, medidas de manejo como el raleo, la poda, y todas aquellas que tiendan a homogenizar la producción simplifican el modelo e incrementan la precisión.

Existen muchos trabajos donde estudian el crecimiento y realizan curvas de crecimiento del fruto, pero su interés principal es medir el efecto de otras variables y no describen como es la metodología de muestreo o las características de la población de frutos (Tukey 1960, Berg 1990, Calegario et al. 1997, Warrington et al. 1999, Austin et al. 1999, Yuri et al. 2011). En frutos cítricos, Severino (2003) muestra como en algunos trabajos (Koch et al. 1996, Franco y Gravina 2000, Otero y Spina 2001) utilizan distintas metodologías de muestreo para obtener modelos de predicción exitosos, como por ejemplo para naranja Valencia, pero no se tienen resultados concluyentes en otras variedades de ciclo de crecimiento más corto. Allí también se propone el modelo Mitscherlich-Spillman como herramienta para modelar el crecimiento del fruto midiendo el diámetro ecuatorial. Un modelo muy utilizado para describir y relacionar el crecimiento de las plantas en respuesta a otros factores (Ware et al., 1982). Dicho

modelo requiere de parámetros que son definidos en base a la variedad, zona climática, ciclo productivo, entre otras variables. Su ecuación es, $f(x) = b_0 (1 - b_1) e^{-b_2 x}$, donde b_0 es el máximo valor que acompaña la asíntota, b_2 la tasa de crecimiento y b_1 un parámetro determinado $b_1 = 1 - f(0)/b_0$. El comportamiento de esta función es asíntótico, con crecimientos crecientes y concavidad negativa.

Cuando se tienen datos graficados y estos datos no se adaptan bien en toda su extensión al modelo, es decir, hay tramos de puntos que están por debajo o por encima del modelo, convencionalmente se pueden ir probando distintos modelos para cada tramo de la curva e ir viendo su ajuste, se va viendo el error, y como se va captando la estructura de datos. Al sumar todos estos modelos en uno, el resultado es un modelo suavizado y adaptado al comportamiento de los datos. Básicamente los modelos GAM hacen este trabajo, van ajustando para cada ventana de datos correspondientes a “x” un modelo para los valores de “y”, y se les denomina aditivos porque agrupan funciones. Su ecuación es, $E(Y | X_1, X_2, \dots, X_p) = \alpha + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p)$ (Stasinopoulos y Rigby 2007, Bruschi 2016).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL

El ensayo se realizó en la zafra 2016/2017, en el predio comercial de la familia Ferrando ubicado en la Av. José Artigas de la localidad de Progreso, departamento de Canelones, Uruguay ($34^{\circ}39'12.0''S$; $56^{\circ}14'06.1''W$).

3.2. MATERIAL VEGETAL Y CARACTERÍSTICAS DEL PREDIO

Se trabajó en un monte de manzanos (*Malus domestica*) cv. Royal Gala que fue implantado en el año 2009, ocupa una superficie de 0.29 ha., se encuentra sobre porta injerto M9, con una distancia de plantación de 1.5m entre plantas y 3.5m entre filas, conducido en eje central. Cuenta con una tubería de riego localizado por fila, realizando el suministro de agua según la demanda atmosférica, el estado hídrico del suelo y la etapa fisiológica del monte. El manejo fitosanitario de los árboles se realiza cumpliendo con las normas de buenas prácticas agrícolas.

Según datos del productor, la fecha de floración del monte fue el 01/10/2016, los frutos comenzaron a cuajar el 06/10/2016, realizó raleo químico con ANA (Ácido 1-naftalenacético) el 10/10/2016 y el raleo manual el 25/12/2016. El período de crecimiento del fruto fue definido entre el 14/11/2016 y 23/01/2017, comenzando en esa fecha para evitar una proporción importante de los frutos que caen naturalmente y culminando con la cosecha, que fue definida por el productor. Se calibran frutos ocasionalmente de forma manual. El manejo del cultivo no se modificó por el ensayo.

La variedad escogida fue Gala porque logra calidad de exportación y su periodo de crecimiento es el más corto dentro de las variedades que se cultivan en Uruguay, se realizó un seguimiento en detalle al manejo que realiza el productor durante el crecimiento ya que algunos eventos pueden alterar la curva de crecimiento.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA EVALUACIÓN

El trabajo implicó diseñar un calibre electrónico o dendrómetro que midiera de “forma continua”, registrando cada una hora el crecimiento en diámetro ecuatorial del fruto y la temperatura del ambiente durante los días comprendidos entre el 14/11/2016 – 23/01/2017, luego de realizado el raleo químico y una vez alcanzado el período de madurez definido por el productor. Se obtuvo en una planilla excel valores de

crecimiento del fruto y temperatura expresados en mm/ hora y °C/ hora, con dos cifras significativas en cada variable. Se realizó el muestreo cada una hora para optimizar el consumo de batería dado que durante las pruebas no existía gran variación de crecimiento en los intervalos más cortos, en relación a la escala de medición del calibre.

Conociendo previamente las características de la población de frutas con el calibre manual, se estimó el valor de la media poblacional para luego buscar e instalar el dendrómetro en un fruto que presentara un diámetro igual.



Figura No. 1. Calibre fijo o dendrómetro

Simultáneamente se determinó de forma manual con un calibre digital (ver figura No. 2) el diámetro ecuatorial de 240 frutos, de 20 plantas al azar dentro del monte, ocupando varias filas, con intervalos de medición de 15 días (Welte 1990, Zhang 1995) para conocer la distribución de tamaños dentro del monte y si estos se pueden relacionar con los valores del “calibre fijo”. Este calibre posee un datalogger, donde se almacenan los datos.



Figura No. 2. Calibre manual con datalogger utilizado en el campo

A continuación, en la figura No. 3 se representa de forma esquemática la curva de crecimiento esperada con cada metodología de medición:

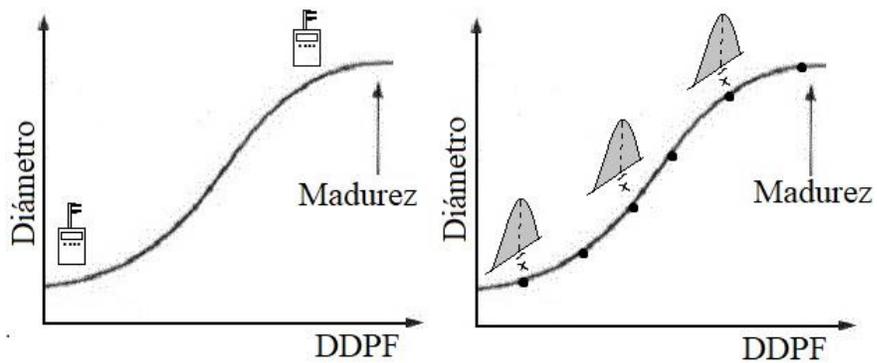


Figura No. 3. Comparación esquemática de ambas metodologías

3.4. VARIABLES A MEDIR

3.4.1. Diámetro de fruto

El diámetro del fruto es una variable medida para evaluar el crecimiento, con el que se puede relacionar y cuantificar eventos importantes que ocurren en el monte (Johnson et al. 1992, De Silva et al. 1997b). Se realizó el seguimiento del diámetro ecuatorial del fruto de forma manual y continua.

En cada evaluación de diámetro con calibrador manual (ver cuadro No. 3) se recorrió el cuadro tomando una muestra de 240 frutos, 20 frutos al azar por planta, de 12 plantas al azar dentro del cuadro.

Cuadro No. 3. Fechas de evaluación con calibre manual

Fecha de evaluación	DDPF	Evento
14/11/2016	37	instalación del ensayo
22/11/2016	46	
29/11/2016	52	
06/12/2016	59	
15/12/2016	67	
22/12/2016	74	raleo manual
29/12/2016	81	
12/01/2017	95	
23/01/2017	106	inicio de cosecha

En base a datos del calibre manual se estimó:

- Evolución de crecimiento de la población, en base a mm/ fruto.
- Distribución de tamaños, como % en base al total de la población.

Se instaló el calibre fijo en un fruto ($\bar{x} = 32\text{mm}$), se obtuvieron 1682 registros en 69 días, entre el 14/11/2016 – 23/01/2017. En base a datos del dendrómetro se estimó:

- Curva de crecimiento diario del fruto, expresado en (mm/hr.; mm/día).
- Crecimiento diurno y nocturno del fruto (%).
- Tasa de crecimiento relativo. TCR (% / día).

Para el cálculo del crecimiento diurno y nocturno se utilizaron los registros de crecimiento horario, en base a esta información se definió el crecimiento diurno como la diferencial de tamaño entre las 06:00 – 19:00 hs., mientras que el crecimiento nocturno queda definido por las horas comprendidas entre las 19:00 – 06:00. Los límites horarios se establecieron en términos generales en base a la presencia de luz en el campo. Se analizaron los resultados mediante test de Tukey.

$$\text{Crecimiento diurno (\%)} = ((\text{tamaño19hs} - \text{tamaño06hs}) / \text{tamaño06hs}) \times 100.$$

$$\text{Crecimiento nocturno (\%)} = ((\text{tamaño06hs} - \text{tamaño19hs}) / \text{tamaño19hs}) \times 100.$$

La tasa de crecimiento relativo TCR (%/día) se calculó en base al incremento de tamaño promedio diario. Los registros horarios se promediaron por día producto del gran volumen de información (24 hs.). La TCR del día se correlaciono con la temperatura promedio diaria

$$\text{TCR (\%/día)} = ((\text{tamaño promedio día 2} - \text{tamaño promedio día 1}) / \text{tamaño promedio día 1}) \times 100.$$

Se analizaron los datos y los resultados de crecimiento obtenidos con calibre manual y calibre fijo utilizando las herramientas estadísticas proporcionadas por RStudio e InfoStat. Se ajustó el modelo Mitscherlich para calibre manual y fijo, y el modelo GAM para comparar ambas metodologías.

3.5. CONSTRUCCIÓN DEL CALIBRE

La construcción del dendrómetro resistivo se basó en los artículos de Klepper (1971), Higgs (1984), Peter (1985), Lang y Thorpe (1989), Lang (1990), Link (1998), Köcher (2012) a este sistema de medición se le agregó una fuente de alimentación con baterías AA, un sensor de temperatura Bosch bmp280 y se le adaptó una memoria SD

extraíble para poder almacenar cada registro en una planilla Excel. En lugar de los soportes metálicos utilizados por los autores citados, se diseñó un soporte acrílico que se fija al fruto para garantizar la correcta medición (figura No. 1). Se logró una precisión de 0.02mm, con un rango de medición de 0.00 – 100.00 mm. Durante la etapa de campo, en las mismas fechas que se calibró de forma manual, se comprobó si el calibre fijo estaba midiendo con precisión y exactitud. El dispositivo se puede configurar para muestrear cada 5, 15, 30 minutos o 1 hora.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DISEÑO DE HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN

El mayor desafío en este trabajo al diseñar una herramienta electrónica que se aplica en el campo está en el punto donde se encuentra la electrónica con la biología, en este caso, en el diseño de la estructura que se une al fruto. Se deben tener muchas variables en cuenta y es necesario que ambos se vinculen con total armonía para que el error en la medición sea el mínimo posible. En las condiciones de cultivo de Uruguay se producen rachas de viento fuerte, la estructura que se encarga de registrar la información debe acompañar el fruto y no puede ser ajustada, porque deforma o daña el fruto. El fruto debe ser representativo. Si bien se reportan mediciones utilizando láser sin estar sujetos al fruto, en estas condiciones de cultivo puede que registre mediciones erróneas producto del movimiento.

Por otra parte, en cuanto a la comunicación, es fundamental que los dispositivos cuenten con un sistema inalámbrico, sino resulta inviable su aplicación en un cultivo comercial donde se deben cubrir grandes superficies y se requieren rápidas respuestas de manejo por un gestor que no puede atender todos los puntos.

Por último, la autonomía de las baterías debe garantizar su funcionamiento durante toda la etapa de crecimiento y desarrollo del cultivo, tener en cuenta que pueden ser muchos los dispositivos instalados.

4.2. CALIBRE MANUAL

4.2.1. Curva de crecimiento

El crecimiento del fruto mostró incremento hasta la última evaluación (106 DDPF) previo al inicio de cosecha. En la figura No. 4 se presenta la evolución de los diámetros de fruta, puede observarse la evolución del crecimiento y la distribución de calibres obtenidos en cada fecha durante la temporada.

En el periodo comprendido entre la primera medición y la última se obtuvo un coeficiente de variación (CV) total de 20.5%. Si se analiza por cada etapa, en el inicio de la medición el CV= 9.4% (DDPF 37) muy próximo al fin de división celular (fruto en estado T, Yuri et al., 2005). La menor dispersión fue de CV = 7.01% (DDPF 46) y se corresponde con el final de caída fisiológica. En la fecha previa a cosecha se obtiene un CV= 7.9% (DDPF 106).

En el DDPF 67 se registró un diámetro promedio menor al anterior, según la información proporcionada por el productor entorno a esta fecha se dejó de regar producto de una rotura en la bomba de riego. Se plantea como hipótesis que la disminución en el tamaño de fruto se debe al estrés hídrico generado por la demanda atmosférica en esta etapa del cultivo y la baja disponibilidad hídrica (Higgs y Jones 1984, Grange y Andrews 1994). Otra hipótesis es que la curva de crecimiento en diámetro tiene un comportamiento más variable que el crecimiento en peso y no es estrictamente de tipo sigmoide simple, según lo reportado por algunos autores (Pearson y Robertson 1956, Lotter et al. 1985, Hussein y Slack 1994), o también puede ser acentuado este comportamiento por un error en la metodología o los intervalos de medición (Ryugo 1988, Magein 1989, Opara 1993, Calegario et al. 1997, Worrell et al. 1998).

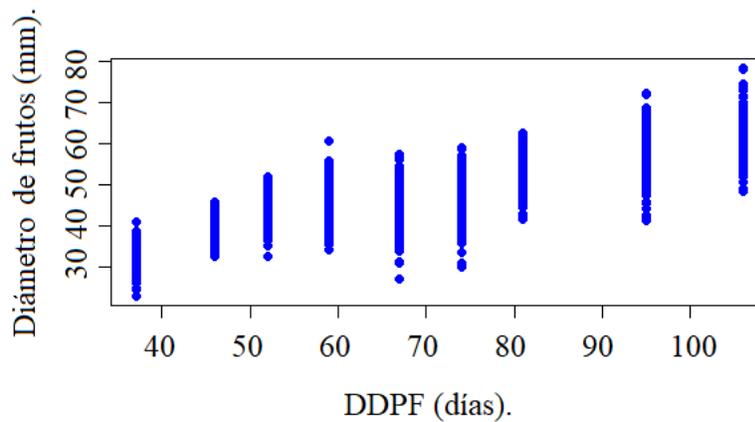


Figura No. 4. Diámetro de frutos obtenidos con calibre manual según DDPF

Para probar el nivel de ajuste del modelo y generar una curva de crecimiento en base a esta información se realizó un análisis de regresión no lineal, de allí se obtuvo que, tamaño (mm) = $8.207 * (1 - 0.9)^{-0.01 * DDPF}$ de tipo Mitscherlich, es el mejor predictor del crecimiento del fruto (figura No. 5). Siendo el p-valor de cada parámetro < 0.0001 y el CME= 22.69, con una correlación $R^2 = 0.86$ entre los valores observados y los predichos por el modelo. El nivel de ajuste de ese modelo concuerda con lo mencionado por algunos autores en el cultivo de manzana (Winter 1969, Welte 1990, Rojas-Lara et al. 2008).

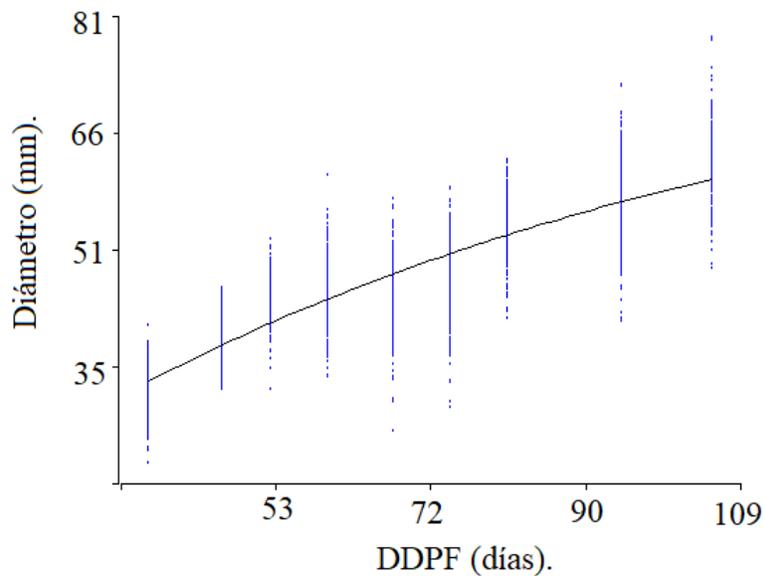


Figura No. 5. Curva de crecimiento del fruto tipo Mitscherlich en función de los DDPF, para calibre manual

4.2.2. Distribución

La variable calibre correspondiente al crecimiento del fruto, cumple con los requerimientos de distribución normal durante todo el periodo de crecimiento, como en el trabajo de Zhang (1995), Otero y Spina (2001), Severino (2003) y señalan la calibración manual como herramienta promisoría para realizar predicción de distribución de calibres.

En la figura No. 6 se observa el número de frutos en función del tamaño y la posición del fruto con el calibre fijo a los 46 DDPF, en esta fecha se tiene la menor dispersión de calibres, la media muestral fue de 39.46 mm y el desvío estándar de la muestra 2.77 mm. El tamaño del fruto evaluado con el calibre fijo fue de 38.25 mm, ubicándose dentro de la muestra con un intervalo de confianza IC = 68%.

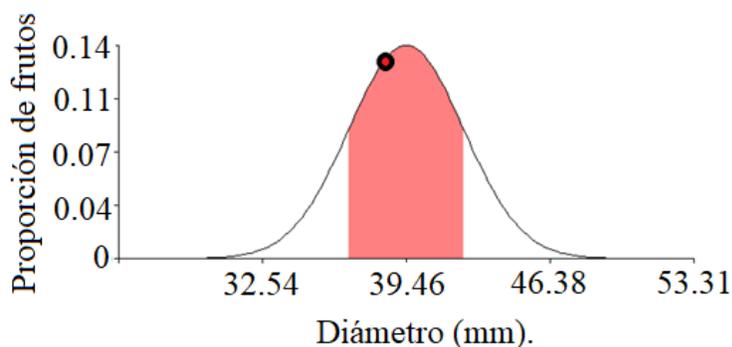


Figura No. 6. Distribución normal de calibres a los 46 DDPF

A los 106 DDPF se mantiene la distribución normal, la media poblacional es de 61.74 mm con un desvío de 4.91 mm y el intervalo de confianza de la muestra es $IC (56.7 \leq x \leq 66.6) = 0.69$. El tamaño del fruto del calibre fijo es de 60 mm, se encuentra dentro del rango muy cercano a la media muestral del calibre manual.

4.3. CALIBRE FIJO

4.3.1. Curva de crecimiento

Con los registros horarios del calibre fijo se calculó el diámetro promedio diario y se construyó la curva de crecimiento del fruto (mm) en función de los DDPF (figura No. 7). Se observa que el diámetro ecuatorial del fruto se incrementó hasta los 106 DDPF y que la curva tiene dos periodos o fases bien claras al igual que los reportados por Casierra et al. (2007), Posada (2007) en donde cambia la tasa de crecimiento relativo (TCR), que en términos generales pasa de crecimientos decrecientes a crecientes entre los 60 - 75 DDPF. La disponibilidad hídrica es fundamental para el crecimiento del fruto, se le puede atribuir este comportamiento al déficit hídrico al no disponer de riego durante el periodo estival producto de la rotura en la bomba de riego entorno a los 60 DDPF. Parra Quezada et al. (2009) mostraron curvas similares a esta para el crecimiento del brote del manzano suprimiendo el riego en el cultivo. Si bien está reportado que el crecimiento del fruto es del tipo sigmoide se puede ver modificado por las condiciones ambientales (Ortega-Farias et al. 2002, Ferree y Warrington 2003, Sozzi 2007, Steduto et al. 2012).

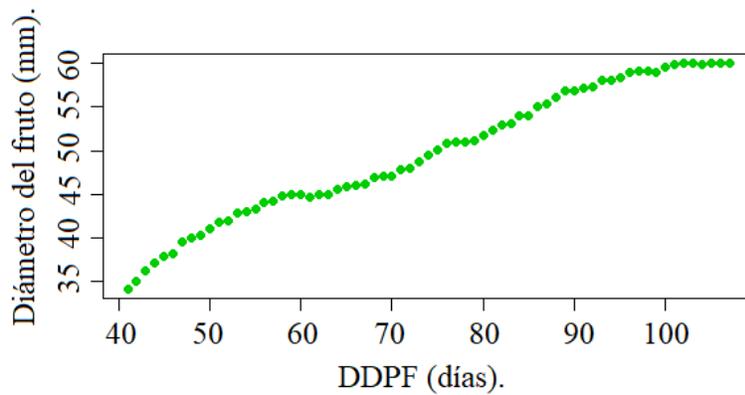


Figura No. 7. Curva de crecimiento del fruto en función de DDPF, obtenida con calibre fijo

Al igual que con los datos de calibre manual se evaluó el nivel de ajuste del modelo de Mitscherlich a los valores observados, de regresión no lineal. Se obtuvo que, tamaño (mm) = $11.162 * (1 - 0.87)^{-0.01 * DDPF}$ siendo p-valor de los parámetros b_0 y $b_1 < 0.0001$ y $b_2 = 0.0004$, el CME = 0.75. El coeficiente R^2 indicó un nivel de ajuste del 99%. Este nivel de ajuste es mayor que el de calibre manual porque no hay variabilidad dentro de fecha, por cómo se disponen los datos, en la calibración manual se tiene la curva de crecimiento de muchos frutos y con el calibre fijo se obtiene la curva real, de un solo fruto.

Como se ve en la figura No. 8, al analizar el gráfico de este modelo y su correlación con la curva real, hay zonas donde el modelo predicho no se ajusta bien con los valores observados, no sigue bien el patrón que describe la curva de crecimiento.

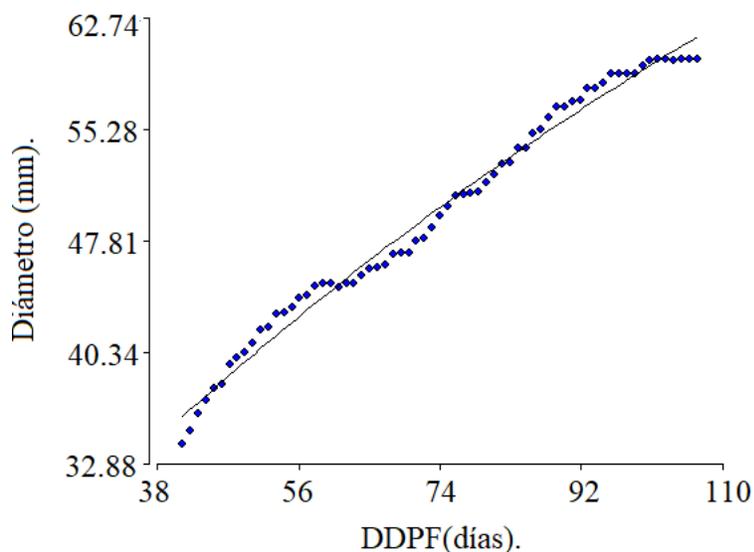


Figura No. 8. Curva de crecimiento del fruto tipo Mitscherlich en función de los DDPF, para calibre fijo

4.3.2. Tasa de crecimiento relativo

En base a la TCR sugerida por West et al. (1920) y a la curva de crecimiento obtenida (figura No. 9), entre los 40-60 DDPF se diferencia una fase de crecimiento decreciente (TCR= 31.7%) y entre los 60-90 DDPF una fase con crecimientos crecientes (TCR= 26.3%), desde los 90-106 DDPF se observa una fase creciente con final estacionario producto de la madurez del fruto (TCR= 5.6 %). La tendencia de las tasas de crecimiento es muy similar a las descritas por Storey y Treeby (1999) en cítricos con curvas doble sigmoide. A diferencia de lo observado, cuando se describe el crecimiento en diámetro como sigmoide simple la mayor tasa de crecimiento se encuentra en el estado I de desarrollo y decrece progresivamente durante el desarrollo del fruto. Está reportado que las fluctuaciones de temperatura junto con el estrés hídrico son la principal causa en las variaciones de crecimiento del fruto, por ende, es determinante en la TCR (Adams 2001, Ortega-Farias et al. 2002, Casierra-Posada 2003, Ferree y Warrington 2003, Raffo 2004, Sozzi 2007, Steduto et al. 2012).

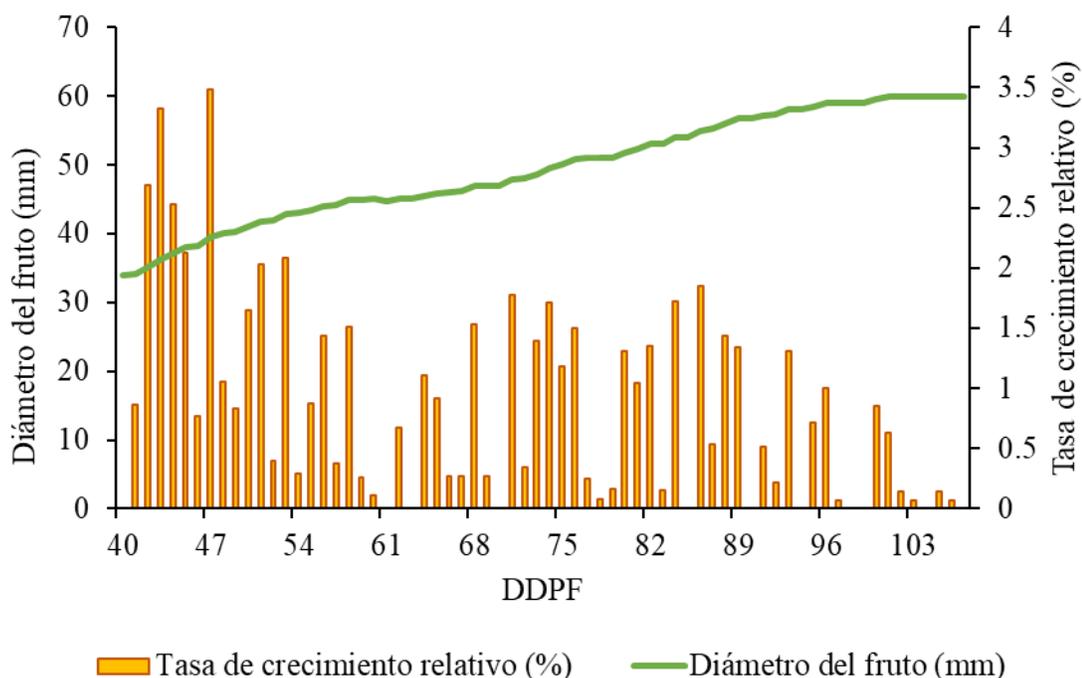


Figura No. 9. Tasa de crecimiento relativo y crecimiento del fruto en función de los DDPF

Con el fin de determinar el grado de correlación entre la TCR y la temperatura promedio diaria, se realizó un análisis de correlación tipo Pearson. Se obtuvo una correlación moderada entre el incremento de temperatura promedio diaria y la TCR igual a -0.48. Este resultado es esperable si se tiene en cuenta que el crecimiento tiene respuesta multifactorial. También se estableció un análisis de regresión lineal (figura No. 10), el modelo si bien sigue la tendencia no logra ajustarse correctamente a los valores dispersos. Sin considerar que la TCR pueda cambiar producto de su ubicación en la curva de crecimiento, cuando las temperaturas tienden a ser más altas la tasa de crecimiento disminuye. Esto puede explicarse porque a mayor temperatura se destina mayor cantidad de agua para regular la temperatura. Debe tenerse en cuenta que durante el periodo de estudio no está el inicio del crecimiento del fruto donde predominan temperaturas más bajas y crecimiento acelerado. En esta evaluación, la TCR máxima registrada fue de 3.48 % con 21.7 °C promedio diario a los 47 DDPF. Para comparar TCR es necesario disponer de mediciones en ciclos diferentes en los mismos DDPF.

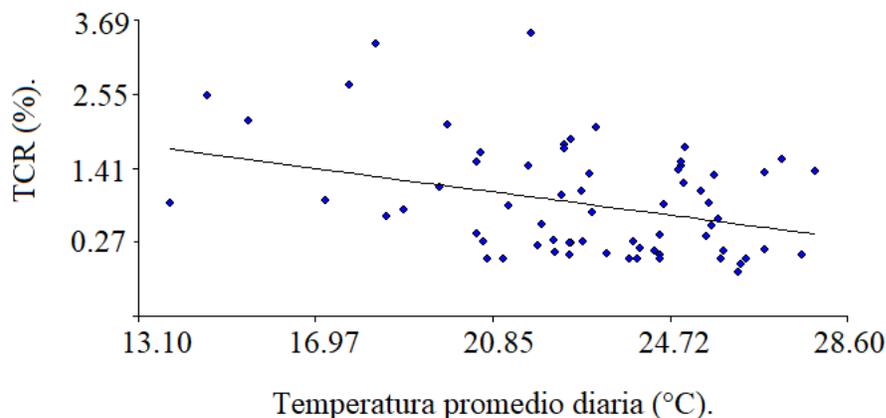


Figura No. 10. Análisis de regresión entre TCR y temperatura promedio diaria (°C)

4.3.3. Diferencias entre el día y la noche

Otro de los resultados obtenidos son las diferencias de crecimiento que se pueden observar entre el día y la noche. Las TCR fueron clasificadas según el momento del día, se separó entre día (06:00-19:00hs) y noche (19:00-06:00hs) dependiendo de la presencia de luz que modifica la radiación recibida y la temperatura del aire en el cultivo.

Los resultados analizados mediante la prueba de hipótesis del test de Tukey con p -valor > 0.05 muestran diferencias significativas de crecimiento entre el día y la noche. Siendo la noche el momento en el que más crece el fruto, con una tasa de crecimiento promedio de 0.58, y para el día de 0.3 (p -valor = 0.017; CME = 0.45). Kozlowski (1967) en su estudio utilizando un sensor de crecimiento ubicado en el tronco reporta que durante el día se contrae, pero durante la noche no tiene cambios como resultado de las variaciones en el contenido de agua. Sin embargo, Kozlowski (1968) realiza una evaluación del crecimiento en el fruto de cereza donde las contracciones varían con la etapa de desarrollo, pero se expanden durante la noche. Huck (1970) reporta cambios en el tamaño de las raíces dependiendo del momento del día. Como hipótesis en base a Higgs y Jones (1984), Lee (1990), Grange y Andrews (1994), Sozzi (2007), Agustí (2008) puede explicarse que durante la noche la planta recupera estado hídrico incrementando el volumen de los tejidos, mientras haya agua disponible en el suelo y existan diferencias de potencial hídrico entre el suelo y la planta. Puede ocurrir que durante algún momento del día la demanda atmosférica sea muy alta, y la diferencia de potencial hídrico no sea suficiente para satisfacer la demanda atmosférica perjudicando el crecimiento.

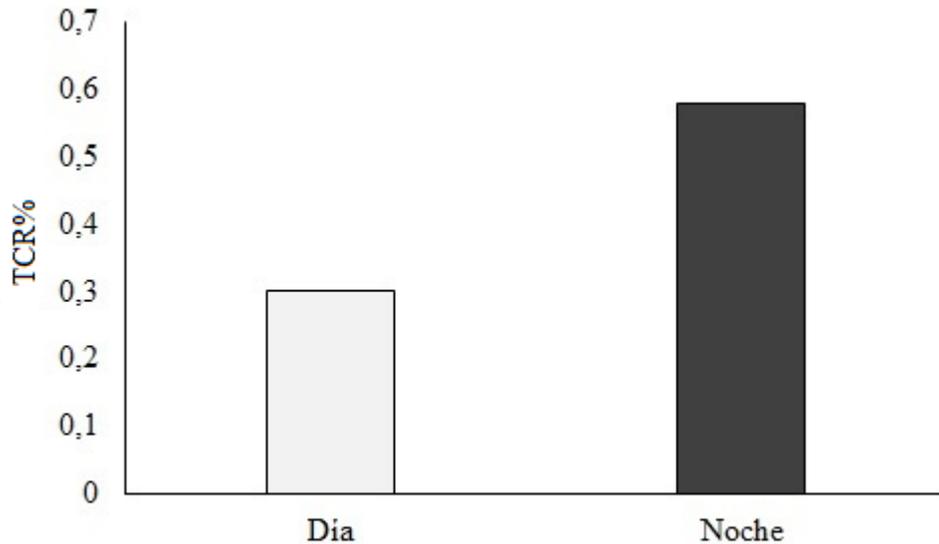


Figura No. 11. Tasa de crecimiento relativo (%) según momento del día

4.4. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS

Para algunas especies se han encontrado modelos capaces de describir apropiadamente la distribución de los distintos calibres de fruta. Ejemplos de ello son los modelos planteados para manzana por Ortega et al. (1997,1998). No resulta así para describir la evolución de crecimiento del fruto. En este trabajo se dispone de datos de calibración manual y calibre fijo para evaluar la posibilidad de describir con precisión el comportamiento de la población de frutos e implementar un modelo que acompañe los datos obtenidos. Se recurre a la implementación de un modelo no paramétrico, que se construye en función de los propios datos. De esta forma no “se fuerzan” los datos a que ajusten en determinado modelo parametrizado preestablecido, sino que se trata de mostrar el patrón que siguen los datos y su comportamiento. El modelo propuesto es aditivo, se calcula una f_j para cada $DDPF_j$, sumándose todas las contribuciones.

Por tanto, la ecuación teórica del modelo para el crecimiento del fruto:

$$\text{Diámetro} = f_j (DDPF_j) + \epsilon_j$$

ε representa el error experimental producto del propio modelo, de la medición, de las diferencias de cada planta, del manejo, del clima, etc.

En base a los datos obtenidos en las 9 fechas de calibración manual se ajustó el modelo GAM, cuya fórmula es, $\text{diámetro} \sim s(\text{ddpf}, k = 6)$. El modelo utilizó efectivamente $s = 4.95$ grados de libertad o de suavizado ($p\text{-valor} < 2e^{-16}$), el resto corresponden al error. El tamaño de la muestra agrupa $n = 1971$ registros. En la figura No. 12 se puede observar el modelo generado con los valores predichos de calibre.

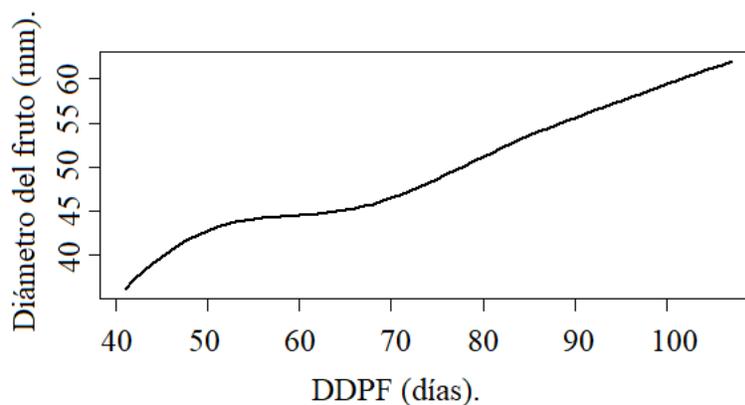


Figura No. 12. Modelo GAM. Diámetro del fruto en función de DDPF

Luego se probó si con el modelo GAM es posible predecir satisfactoriamente los datos de calibre fijo. Para esto se generaron intervalos de confianza, en donde cada valor de calibre fijo debe estar contemplado dentro de este rango. La figura No. 13 muestra los resultados del modelo con los intervalos de confianza generados. Los intervalos de confianza no son uniformes durante el periodo de crecimiento, el valor más alto se obtuvo en el día 106 DDPF, siendo de 0.65mm la distancia entre la banda superior e inferior, en el día 61 DDPF se obtuvo el menor, con una distancia de 0.354mm y el promedio de los intervalos de confianza fue de 0.424mm.

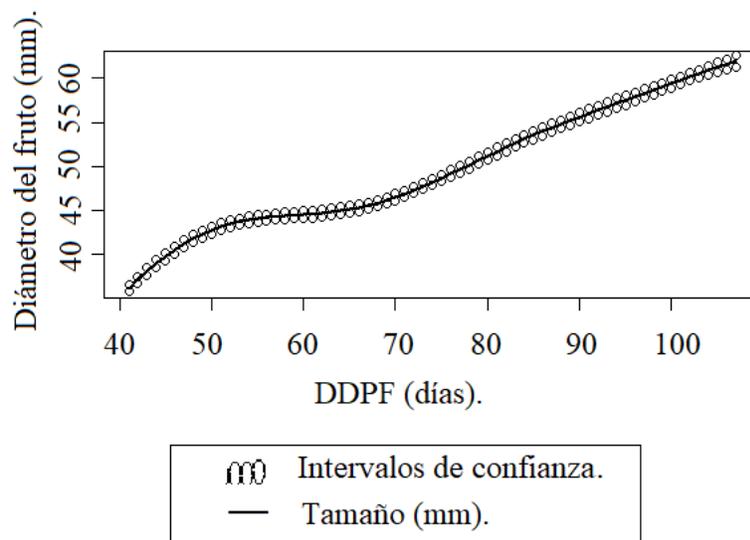


Figura No. 13. Modelo GAM. Diámetro del fruto en función de los DDPF, con intervalos de confianza

Posteriormente se comprobó si el modelo ajustado predice bien los datos obtenidos con la curva del calibre fijo, figura No. 14. Se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.99$ entre ambos modelos. A excepción de algunos puntos, la curva de crecimiento de calibre fijo se encuentra dentro del intervalo de confianza generado y describe mejor el comportamiento que el modelo Mitscherlich. Se calculó el error de predicción de dicho modelo expresado como la raíz del cuadrado medio del error, el valor fue de 1.13 mm. El desvío estándar del error (DEE) al comparar los valores observados y los predichos por el modelo fue de 1.27mm, y el error absoluto (Ea %) de 1.05 %.

Ortega-Farías et al. (2002) en su trabajo concluyen que la estimación de crecimiento de fruto está muy ligada a las características y condiciones del predio, por tanto, no sería adecuado comparar curvas obtenidas de distintos lugares esperando resultados similares. Se encontraron reportes que describen el crecimiento de los frutales de pepita como una curva de tipo sigmoide simple (Bain 1958, Gilfillan 1987, Thornley y Johnson 1990, Guardiola 1992, Agustí et al. 1995, Ortega et al. 1998). Tachini y De Iacovo (2018) realizaron un estudio en los departamentos de San José y Canelones con 11 productores de manzana cv. Gala en un mismo año y obtuvieron curvas de crecimiento distintas para cada productor, si bien ajustan curvas del tipo sigmoide estas se obtienen de visitas cada 15 días con calibre manual. Al analizar el modelo GAM (figura No. 14) se puede observar que al inicio y en el último tramo no tiene buen ajuste

y no logra acompañar la curva de crecimiento real, esto podría solucionarse incrementando el valor “k”, pero el modelo se torna más complejo, se desajusta en otras zonas y no logra solucionar del todo este problema. Tener precisión en el último tramo es importante para tomar decisiones en la cosecha y la comercialización del producto. Se debe tener en cuenta que si se instala el calibre en etapas muy tempranas del desarrollo del fruto con fines de ajustar un modelo puede que los resultados no sean promisorios, producto de la variabilidad y la caída natural de frutos. Es necesario tener en cuenta que el nivel de ajuste del modelo de predicción para el tamaño del fruto puede variar. Un lineamiento acorde entre las conclusiones planteadas por otros autores y los resultados de este trabajo.

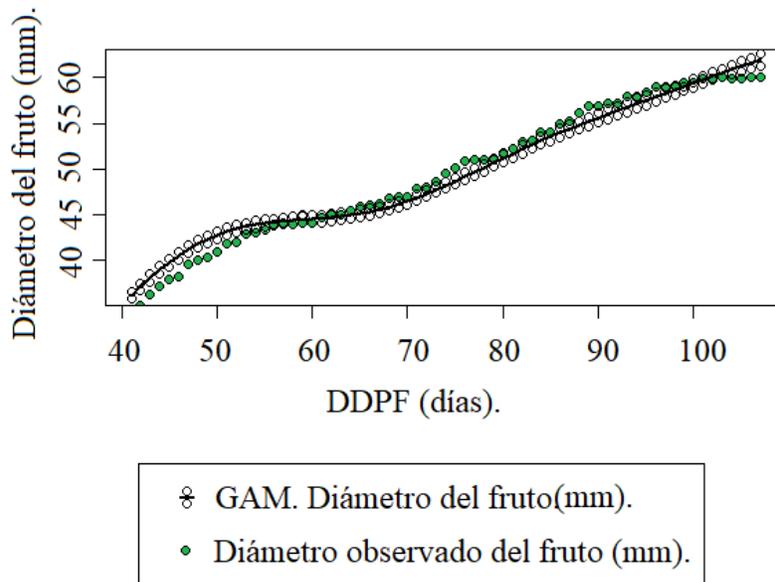


Figura No. 14. Diámetro del fruto predicho por modelo vs. diámetro calibre continuo

Con los resultados de este trabajo se propone combinar en una metodología, la calibración manual con el calibre fijo, este último permite disminuir el número de intervenciones con calibre manual porque no se tienen que destinar mediciones manuales para la construcción de una curva de crecimiento detallada que describa alteraciones sobre los niveles de producción. Combinadas dan una perspectiva en dos dimensiones sobre lo que ocurre con la población de frutos.

Es muy importante en términos productivos generar una serie histórica de datos de crecimiento, establecer una metodología de medición y cumplirla año a año en base a los criterios establecidos.

El número de mediciones manuales dependerá del año y de las características del cultivo. Con sucesivos años de evaluación se puede determinar un rango óptimo de mediciones para un monte, pero como pauta, siempre es necesario tomar una medición al inicio y otra previa a cosecha, limitándose a tomar otras medidas cuando ocurran eventos que alteren la variabilidad poblacional ya existente.

El número de frutos y plantas a muestrear depende de las características del monte, en esta evaluación cada muestra estaba compuesta por 240 frutos, de 12 plantas al azar y un fruto con calibre fijo. Pero no tiene por qué ser así, como pasa con las curvas de crecimiento y el ajuste de los modelos, no se puede tener un valor estandarizado. El tamaño de la muestra depende de la variabilidad generada principalmente por las condiciones ambientales y el manejo.

Elegir el fruto de calibre medio en el estado fisiológico establecido es adecuado para mantener una buena estimación del crecimiento de la población, tras los resultados de dispersión y el nivel de ajuste con los modelos. En la evaluación la curva de crecimiento correspondiente al diámetro del fruto se ajustó satisfactoriamente al modelo GAM, visualmente parece una curva doble sigmoide, similar a las descritas para los frutales de carozo (Bozzolo et al. 1988, Fregoni 1999) producto del descenso en la tasa de crecimiento luego de los 60 DDPF. Este comportamiento puede estar relacionado a las restricciones hídricas más que a la evolución normal del calibre de fruto. Por este motivo, bajo las condiciones de estudio el modelo GAM resultó más adecuado que el Mitcherlitch dada su capacidad de responder a esta situación particular.

El modelo de predicción debe ser considerado en términos generales, no como una regla que siempre se cumple. Para lograr buenos niveles de predicción tiene que ser ajustado para las condiciones de cada predio, porque los frutos como población no crecen siguiendo un modelo estandarizado, sino que modifican su tamaño y definen las fases de crecimiento en respuesta al manejo, al ambiente, dependiendo del lugar y del año.

5. CONCLUSIONES

El diámetro del fruto se debe cuantificar por ser un atributo de calidad que determina el precio y contribuye al rendimiento dada su correlación con el peso. Es una variable que responde a múltiples factores y la posibilidad de correlacionar la respuesta con parámetros del ambiente-planta para visualizar el efecto del manejo es imprescindible.

5.1. HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN

Fue posible describir detalladamente la evolución del crecimiento del fruto. Se diseñó un dispositivo capaz de medir el crecimiento de fruto que almacena registros en forma horaria durante todo el ciclo de crecimiento.

5.2. EVOLUCIÓN DE CRECIMIENTO DE FRUTOS

Las condiciones ambientales de Uruguay tan variables entre años justifican la cuantificación de los factores que intervienen en el crecimiento, para identificar a tiempo y mitigar posibles disminuciones en la TCR implementando medidas de manejo. Aquí la importancia de que cada productor genere una serie de datos históricos sobre crecimiento del fruto para cada cuadro en sus condiciones específicas de cultivo. Si se describe el comportamiento del crecimiento del fruto durante varios años, combinando ambas metodologías de medición y aplicando modelos no paramétricos, se puede llegar a un grado de predicción muy acertado. Tanto las frecuencias de muestreo manual como el número de calibres fijos instalados en el campo son determinantes para lograr buena precisión y ajuste del modelo de predicción. Los frutos no parecen seguir un modelo, los modelos siguen a los frutos.

Por último, se concluye a través de los resultados que los frutos crecen en diámetro significativamente en la noche, con una TCR promedio = 0.58 (p-valor=0.017; CME=0.45).

5.3. COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS

El mejor resultado se obtiene de la comparación entre metodologías. Al integrar la calibración manual que en mayor medida refleja la dispersión de frutos existente en el monte durante el ciclo de crecimiento del cultivo y el calibre fijo que representa la variación en cada fruto mediante la TCR. No se puede optar por una de estas herramientas pensando en que una pueda sustituir a la otra.

De los modelos evaluados, el GAM es el mejor predictor para el crecimiento del fruto ($R^2 = 0.99$). Tiene buen nivel de ajuste y acompaña la tendencia de las variaciones en la TCR.

Elegir el fruto de calibre medio en el estado fisiológico establecido es adecuado para mantener una buena estimación del crecimiento de la población, pero para realizar una comparación entre metodologías más precisa es necesario disponer de mayor número de calibres fijos y de un protocolo con análisis estadístico para conocer en que frutos se instala el calibre.

6. RESUMEN

Los productores de manzanas en Uruguay tienen como desafío mejorar la eficiencia de producción, la calidad del producto e incrementar la exportación. Es de vital importancia disponer de información sobre el crecimiento del fruto y evaluar medidas de manejo para que no se vean resentidos los rendimientos o perjudicada la comercialización. Por este motivo surge la importancia de diseñar una herramienta y ajustar una metodología de medición sobre el crecimiento del fruto que no sea costosa y se aplique en el sector productivo. Se evaluó durante la zafra 2016/2017 en un predio comercial de manzana ‘Gala’ de la zona de Progreso, el crecimiento del fruto desde los 37 DDPF hasta el inicio de cosecha definido por el productor. Las mediciones fueron realizadas utilizando un calibre digital manual con intervalos de medición semanales y un calibre digital con sensor de temperatura e intervalos de medición horarios diseñado a efectos de la evaluación que quedó fijo en la planta. Se registró información del diámetro ecuatorial del fruto (mm), temperaturas (°C) y otras variables mediante entrevistas con el productor. Se elaboró la curva de crecimiento con cada herramienta de medición, se compararon y se analizaron estadísticamente. Ambas herramientas son complementarias, su utilización combinada aporta información valiosa para modelar y lograr predecir con mayor exactitud el crecimiento del fruto. Los resultados mostraron que el calibre manual es útil para describir la variabilidad existente durante periodo ($CV = 20.5\%$) y para generar un modelo GAM ($R^2 = 0.99$), el cual logra predecir con exactitud el comportamiento del calibre fijo ($Ea = 1.05\%$). El calibre fijo con sus reducidos intervalos de medición describe detalladamente la curva de crecimiento y las variaciones en la tasa de crecimiento relativo.

Palabras clave: Crecimiento del fruto; Tamaño del fruto; Dendrómetro; Sensor de crecimiento; Metodología de medición.

7. SUMMARY

Apple growers in Uruguay have the challenge of improving production efficiency, product quality and increasing exports. It is vitally important to have information on the growth of the fruit and to evaluate management measures so that the yields are not resented or the marketing is harmed. For this reason, the importance of designing a tool and adjusting a measurement methodology on fruit growth that is inexpensive and applied in the productive sector arises. Fruit growth from 37 DDPF to the start of harvest defined by the producer was evaluated during the 2016/2017 harvest in a commercial plot of 'Gala' apple in the Progreso area. Measurements were made using a manual digital caliper with weekly measurement intervals and a digital caliper with temperature sensor and hourly measurement intervals designed for evaluation purposes that was fixed at the plant. Information on the equatorial diameter of the fruit (mm), temperatures ($^{\circ}$ C) and other variables was recorded through interviews with the producer. The growth curve was made with each measurement tool, they were compared and statistically analyzed. Both tools are complementary, their combined use provides valuable information to model and more accurately predict fruit growth. The results showed that the manual caliber is useful to describe the variability existing during the period (CV = 20.5%) and to generate a GAM model ($R^2 = 0.99$), which manages to accurately predict the behavior of the fixed caliber (Ea = 1.05 %). The fixed gauge with its short measurement intervals describes in detail the growth curve and the variations in the relative growth rate.

Key words: Fruit growth; Fruit size; Dendrometer; Growth sensor; Measurement methodology.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, S. R.; Cockshull, K. E.; Cave, C. R. J. 2001. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany*. 88(5):869-877.
2. Aggelopoulou, K.; Bochtis, D.; Fountas, S.; Swain, K.; Gemtos, T.; Nanos, G. 2011. Yield prediction in apple orchards based on image processing. *Precision Agriculture*. 12:448-456.
3. Agustí, M.; Almela, V.; Aznar, M.; Juan, M.; Eres, V. 1995. Desarrollo y tamaño final del fruto en los agrios. Valencia, España, Generalitat Valenciana. 80 p.
4. _____. 2008. Crecimiento y maduración del fruto. *In*: Azcón-Bieto, J.; Talón, M. eds. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Barcelona, McGraw-Hill Interamericana. pp. 483-498.
5. Austin, P. T.; Hall, A. J.; Gandar, P. W.; Warrington, I. J.; Fulton, T. A.; Halligan, E. A. 1999. A compartment model of the effect of early-season temperatures on potential size and growth of 'Delicious' apple fruits. *Annals of Botany*. 83(2):129-143.
6. Bain, J. M. 1958. Morphological anatomical and physiological changes in the developing fruit of the Valencia orange (*Citrus sinensis*. (L.) Osbeck). *Australian Journal of Botany*. 6:1-24.
7. Barriga, I. 2003. Tendencia en el mercado de la manzana en los últimos 20 años. Talca, Chile. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía. 47 p.
8. Batjer, L. P.; Martin, G. C. 1965. The influence of night temperature on growth and development of early Redhaven peaches. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 87:139-144.
9. Beadle, G. L. 1993. Growth analysis. *In*: Hall, D. O.; Scurlock, J. M. O.; Bolharnordenkampfh, H. R.; Leegood, R. C.; Long, S. P. eds. *Photosynthesis and production in a changing enviroment: a field and laboratory manual*. London, Chapman and Hall. pp. 36-46.

10. Beedlow, P. A.; Daly, D. S.; Thiede, M. E. 1986. A new device from measuring fluctuations in plant stem diameter: implications for monitoring plant responses. *Environmental Monitoring and Assessment*. 6:278- 281.
11. Bergh, O. 1990. Effect of temperature during the first 42 days following full bloom on apple fruit growth and size at harvest. *South African Journal of Plant and Soil*. 7:11-18.
12. Bozzolo, A.; Araya, E.; Sudzuki, F.; Gil, G. 1988. Bases para un modelo de predicción de calibres de frutos de kiwi. *Frutícola*. 9(3):69-72.
13. Bruschi, K. T. 2016. Generalized additive models for very large datasets with apache spark. Hamburg, University of Hamburg. 67 p.
14. Calegario, F. F.; Puschmann, R.; Finger, F. L.; Costa, A. F. S. 1997. Relationships between peel color and fruit quality of papaya (*Carica papaya* L.) harvested at different maturity stages. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 110:228-231.
15. Casierira-Posada, F.; Hernández, D. I.; Lüdders, P.; Ebert, G. 2003. Crecimiento de frutos y ramas de manzano 'Anna' (*Malus domestica* Borkh.) cultivado en los altiplanos colombianos. *Agronomía Colombiana*. 21(1-2):69-73.
16. De Silva, H. N.; Lai, C. D.; Ball, R. D. 1997a. Fitting SB distributions to fruit sizes with implications for prediction methods. *The Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*. 2:333-346.
17. _____; Tustin, D. S.; Cashmore, W. M.; Stanley, C. J.; Lupton, G.; McArtney, S. J. 1997b. Fruit fresh mass-diameter relationship for 'Royal Gala' apple across seasons and among fruit production regions of New Zealand. *HortScience*. 32:1169-1173.
18. _____; Ball, R. D. 1997c. Mixed model analysis of within-plant variation of fruit weight with implications for sampling of kiwifruit vines. *Annals of Botany*. 79:411-418.
19. _____; Hall, A. J.; Cashmore, W. M.; Tustin, D. S. 2000. Variation of fruit size and growth within an apple tree and its influence on sampling methods for estimating the parameters of mid-season size distributions. *Annals of Botany*. 86(3):493-501.

20. Díaz-Pérez, J. C.; Shackel, K. 1991. Diurnal fluctuations in size tomato fruit. *HortScience*. 26:683-685.
21. Eguchi, T.; Araki, T.; Kitano, M. 2007. Non-contact measurements of storage organ growth in fruit and root crops. *Environmental Control in Biology*. 45(4):251-258.
22. Elias, C. O.; Causton, D. R. 1976. Studies on data variability and the use of polynomials to describe plant growth. *New Phytologist*. 77:421-430.
23. Erez, A. 1994. Means to compensate for insufficient chilling to improve bloom and leafing. *Acta Horticulturae*. no. 395:81-96.
24. Erickson, R. O. 1976. Modeling of plant growth. *Annual Review of Plant Physiology*. 27:407-434.
25. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2013. FAOSTAT. (en línea). Rome. s.p. Consultado may. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/>
26. Fischer, D. V. 1962. Heat units and number of days required to mature some pome and stone fruits in various areas of North America. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 80:114-124.
27. Fisher, R. A. 1921. Some remarks on the methods formulated in a recent article on "the quantitative analysis of plant growth.". *Annual Apple Biology*. 7:367-372.
28. Franco, J.; Gravina, A. 2000. Early prediction of fruti size at harvest for 'Valencia' Orange using experimental data. *Proceedings of the International Society of Citriculture*. 1:456-458.
29. Fregoni, M. 1999. *Viticultura di qualità*. Verona, l'Informatore Agrario. 707 p.
30. Gilfillan, I. M. 1987. Factors affecting fruti size in 'Tomango' and 'Valencia' oranges and practical measures for its improvement. *Citrus Journal*. 638:7-13.
31. Gourdrian, J.; Monteith, J. L. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annual Biology*. 66:695-701.

32. Grange, R. I.; Andrews, J. 1994. Expansion rate of young tomato fruit growing on plants at positive water potential. *Plant, Cell & Environment*. 17(2):181-187.
33. Guardiola, J. L. 1992. Fruit set and growth. In: *Seminário Internacional de Citros (2º., 1992, Bebedouro, SP)*. Proceedings. Bebedouro, Sao Pablo, Brazil, s.e. pp.1-30.
34. Gustafson, F. G. 1926. Growth studies on fruits. *Plant Physiology*. 1:265-272.
35. _____. 1927. Growth studies on fruit: an explanation of the shape of the growth curve. *Plant Physiology*. 2:153-161.
36. Higgs, K. H.; Jones, H. G. 1984. A microcomputer-based system for continuous measurement and recording fruit diameter in relation to environmental factors. *Journal of Experimental Botany*. 35(11):1646-1655.
37. Huck, M. G.; Klepper, B.; Taylor, H. M. 1970. Diurnal variations in root diameter. *Plant Physiology*. 45(4):529.
38. Hughes, A. P.; Freeman, P. R. 1967. Growth analysis using frequent small harvests. *Journal of Applied Ecology*. 4:553-560.
39. Hunt, R. 1978. *Plant growth analysis*. London, Edward Arnold. 67 p. (Studies in Biology no. 96).
40. Hussein, I. A.; Slack, D. C. 1994. Fruit diameter and daily fruit growth rate of three apple cultivars on rootstock-scion combinations. *HortScience*. 29:79-81.
41. Johnson, R. W.; Dixon, M. A.; Lee, D. R. 1992. Water relations of the tomato during fruit growth. *Plant Cell Environment*. 15:947-953.
42. Klepper, B.; Browning, V. D.; Taylor, H. M. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*. 48(6):683-685.
43. Koch, N.; Theron, K.; Rabe, E. 1996. Fruit size prediction in 'Clementine' and 'Satsuma' mandarin and improvement of 'Clementine' mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit size by 2,4-DP. *Proceedings of the International Society Citriculture*. 2:739-744.

44. Köcher, P.; Horna, V.; Leuschner, C. 2012. Environmental control of daily stem growth patterns in five temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*. 32(8):1021-1032.
45. Kozłowski, T. T. 1967. Diurnal variations in stem diameters of small trees. *Botanical Gazette*. 128(1):60-68.
46. _____. 1968. Diurnal changes in diameters of fruits and tree stems of Montmorency cherry. *Journal of Horticultural Science*. 43(1):1-15.
47. Lang, A.; Thorpe, M. R. 1989. Xylem, phloem and transpiration flows in a grape: application of a technique for measuring the volume of attached fruits to high resolution using Archimedes' principle. *Journal of Experimental Botany*. 40:1069-1078.
48. _____. 1990. Xylem, phloem and transpiration flows in developing apple fruits. *Journal of Experimental Botany*. 41:645-651.
49. Lakso, A. N.; Grappadelli, L. C.; Barnard, J.; Goffinet, M. C. 1995. An exponential model of the growth pattern of the apple fruit. *Journal of Horticultural Science*. 70:389-394.
50. Lee, D. R. 1990. A unidirectional water flux model of fruit growth. *Canadian Journal of Botany*. 68(6):1286-1290.
51. Leopold, A. C. 1964. *Plant growth and development*. New York, McGraw-Hill. 466 p.
52. Link, S. O.; Thiede, M. E.; Bavel, M. V. 1998. An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter. *Journal of Experimental Botany*. 49(326):1583-1587.
53. Lotter, J. V.; Beukes, D. J.; Weber, H. W. 1985. Growth and quality of apples as affected by different irrigation treatments. *Journal of Horticultural Science*. 60:181-192.
54. Lötze, E.; Bergh, O. 2004. Early prediction of harvest fruit size distribution of an apple and pear cultivar. *Scientia Horticulturae*. 101(3):281-290.
55. McKee, H. S.; Nestel, L.; Robertson, R. N. 1955. Physiology of pea fruits. II. Soluble nitrogenous constituents in the developing fruit. *Australian Journal of Biological Sciences*. 8:467-475.

56. Magein, H. 1989. Growth and abscission dynamics of 'Cox's Orange Pippin' and 'Golden Delicious' apple fruits. *Journal of Horticultural Science*. 64:265-273.
57. Marcelis, L. F. M. 1992. Non-destructive measurements and growth analysis of the cucumber fruit. *Journal of Horticultural Science*. 67:457-464.
58. _____; Hofman-Eijer, L. R. B. 1995. Growth analysis of sweet pepper fruits (*Capsicum annum* L.). *Acta Horticulturae*. no. 412:470-478.
59. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2012a. Censo general agropecuario 2011. Montevideo. 142 p.
60. _____. _____. 2012b. Encuesta frutícola: zafra 2011-2012. (en línea). Montevideo. 27 p. Consultado mar. 2017. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/estadisticas-y-documentos/hortifruticultura>.
61. _____. _____. 2016. Censo general agropecuario 2016. Montevideo. 157 p.
62. Nerd, A.; Mizrahi, Y. 1998. Fruit development and ripening in yellow pitaya. *Journal of the American Society Horticultural Science*. 123:560-562.
63. Observatorio Granjero, UY. 2018. Situación de la oferta de frutales de hoja caduca – enero 2018. (en línea). Montevideo. 19 p. Consultado mar. 2019. Disponible en <http://www.mercadomodelo.net/informes-y-estudios>.
64. Opara, L. U. 1993. A study of stem-end splitting in apples. PhD. thesis. Palmerston North, New Zealand. Massey University. 261 p.
65. Ortega, S.; Flores, L.; Retamales, J. 1997. Elaboración de una tabla para predecir calibre de manzanas, variedad red spur. *Frutícola*. 18(1):21-25.
66. _____. _____. _____. 1998. Modelo logístico para predecir el crecimiento en diámetro de las manzanas (variedad Granny Smith). *Frutícola*. 19(1):15-18.

67. _____.; _____.; León, L. 2002. Elaboración de una tabla predictiva de diámetro de manzanas cv. Granny Smith usando los grados días acumulados. *Agricultura Técnica*. 62(4):624–632.
68. Otero, A.; Spina, M. 2001. Modelación del crecimiento de la fruta cítrica para la predicción del tamaño del fruto. (en línea). In: Jornada de Avances de Investigación en Fertilización, Riego y Manejo (2001, Salto Grande). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 3-12 (Actividades de Difusión. no. 255). Consultado sep. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7345/1/sad-255.pdf>
69. Parra Quezada, R. Á.; Ortiz Franco, P.; Amado Álvarez, J. P.; Chávez Sánchez, N. 2009. Productividad y crecimiento de manzano bajo déficit de riego controlado. *Terra Latinoamericana*. 27(4):337-343.
70. Pearson, J. A.; Robertson, R. N. 1956. The physiology of growth in apple fruits. *Australian Journal of Biological Sciences*. 6:1-20.
71. Posada, F. C.; Cardozo, M. C.; Hernández, J. C. 2007. Análisis del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero. *Agronomía Colombiana*. 25(2):299-305.
72. Radford, P. J. 1967. Growth analysis formulae: their use and abuse. *Crop Science*. 7:171-175.
73. Raffo, D. 2004. Efecto de las altas temperaturas sobre la calidad de los frutos. *Rompecabezas tecnológico. Factores Climáticos*. 10(40):12-16.
74. Rojas-Lara, P. C.; Pérez-Grajales, M.; Colinas-León, M. T. B.; Sahagún-Castellanos, J.; Avitia-García, E. 2008. Mathematical models for estimating fruit growth in apple pepper (*Capsicum pubescens* R and P). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 14(3):289-294.
75. Ryugo, K. 1988. *Fruit culture: its science and art*. New York, Wiley. 344 p.
76. Schapendonk, A. H. C. M.; Brouwer, P. 1984. Fruit growth in cucumber in relation to assimilate supply and sink activity. *Scientia Horticulturae*. 23:21-33.
77. Schenk, R. U. 1961. Development of the pea fruit. *Georgia Agricultural Experiment Station Technical Bulletin*. 22:1-53.

78. Sepúlveda, Á.; Yuri, J. A. 2010. Clima y calidad de fruto. Universidad de Talca. Centro de Pomáceas. Boletín técnico no. 10(1):1-4.
79. Severino, V. 2003. Predicción temprana de tamaño final de fruto y porcentaje de calibres comerciales a cosecha en variedades cítricas. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 42 p.
80. Sozzi, G. 2007. Árboles frutales: ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 511 p.
81. Stasinopoulos, D.; Rigby, R. 2007. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software*. 23(7):1-47.
82. Stanley, C. J.; Tustin, D. S.; Lupton, G. B.; McArtney, S.; Cashmore, W. M.; Silva, H. D. 2000. Towards understanding the role of temperature in apple fruit growth responses in three geographical regions within New Zealand. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 75(4):413-422.
83. Steduto, P.; Hsiao, T.; Fereres, E.; Raes, D. 2012. Respuesta de los cultivos al agua. Roma, FAO. 510 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje. no. 66).
84. Storey, R.; Treeby, M. T. 1999. Short- and long-term growth of navel orange fruit. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 74(4):464-471.
85. Struik, P. C.; Schnieders, B. J.; Kerckhoffs, L. H.; Visscher, G. W. 1988. A device for measuring the growth of individual potato tubers non-destructively and precisely. *Potato Research*. 31:137-143.
86. Tachini, R.; De Iacovo, M. J. 2018. Determinación de factores que limitan la productividad en cultivos de Manzana de alto potencial. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 65 p.
87. Tazuke, A.; Sakiyama, R. 1984. Growth analysis of cucumber fruits on vine by use of the dimensions of fruit shape. *Japanese Society of Horticultural Science*. 53:30-37.

88. Topp, B. L.; Sherman, W. B. 1989. The relationship between temperature and bloom-to-ripening period in low-chill peach. *Fruit Variation*. 43:155-159.
89. Tronstad, R. 1995. Importance of melon type, size, grade, container, and season in determining melon prices. *Journal Agricultural Resource Economics*. 20:32-48.
90. Tukey, L. D. 1960. Some effects of night temperature on the growth of McIntosh apples, II. *Journal of the American Society Horticultural Science*. 75:39-46.
91. Volz, R. K. 1991. Fruit quality and productivity on apple replacement branches. Thesis PhD. Physiology, Palmerston North, New Zealand. Massey University. 326 p.
92. Ware, G. O.; Ohki, K.; Moon, L. C. 1982. The Mitscherlich plant growth model for determining critical nutrient deficiency levels 1. *Agronomy Journal*. 74(1):88-91.
93. Wareing, P. F.; Phillips, I. D. J. 1970. The control of growth and differentiation in plants. London, Pergamon. 308 p.
94. Warrington, I. J.; Fulton, T. A.; Halligan, E. A.; De Silva, H. N. 1999. Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 124(5):468-477.
95. Wehner, T. C.; Saltveit, M. K. Jr. 1983. Photographic analysis of cucumber fruit elongation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 108:465-468.
96. Weinberger, J. H. 1948. Influence of temperature following Bloom on fruit development period of Elberta peach. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 51:175-178.
97. Welte, H. F. 1990. Forecasting harvest fruit size during the growing season. *Acta Horticulturae*. no. 276:275-282.
98. West, C.; Briggs, G. K.; Kidd, F. 1920. Methods and significant relations in the quantitative analysis of plant growth. *New Phytologist*. 19:200-207.

99. Winter, F. 1969. Die 'Behangdichten-Methode', ein Modell zur Analyse und Prognose von Kernobsterträgen. Agrar statistische Studien. Statistikamt der Europäischen. 5:27-41.
100. Worrell, D. B.; Carrington, C. M. S.; Huber, D. J. 1998. Growth, maturation and ripening of soursop (*Annona muricata* L.) fruit. *Scientia Horticulturae*. 76:17-28.
101. Yuri, J. A.; Lepe, V.; Neira, A.; Sepúlveda, Á. 2005. Crecimiento de la manzana. Universidad de Talca. Centro de Pomáceas. Boletín técnico no. 5(1):1-3.
102. _____.; Sepúlveda, Á.; Lepe, V. 2011a. Comportamiento del manzano en diferentes zonas productivas de Chile. Talca, Universidad de Talca. 200 p.
103. _____.; González Tállice, J.; Verdugo, J.; Del Pozo, A. 2011b. Responses of fruit growth, quality, and productivity to crop load in apple cv. Ultra Red Gala/MM111. *Scientia Horticulturae*. 127:305-312.
104. Zambon, I.; Cecchini, M.; Egidi, G.; Saporito, M. G.; Colantoni, A. 2019. Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*. 7(1):1-36.
105. Zhang, J.; Thiele, G. F.; Rowe, R. N. 1995. Gala apple fruit size distribution. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 23(1):85-88.