



Título del trabajo: **USO DE PRE-TRATAMIENTOS CON 1-METILCICLOPROPENO (1-MCP)
PARA REDUCIR EL ABLANDAMIENTO INDUCIDO POR EL BROMURADO EN ARÁNDANO**
(*Vaccinium corymbosum*)

Nombre de la alumna: Franceschinis, Fiamma

Nº de Legajo: 26795/8

D.N.I.: 35.941.597

Director: Dr. Gustavo Esteban Gergoff Grozeff

Co-director: Dr. Ariel R. Vicente

Fecha de entrega: 24 de abril de 2018

Mis agradecimientos a mis papas, Luis y Graciela, que hicieron posible mi sueño de ser ingeniera. Gracias por enseñarme siempre a ser buena persona, fuerte e independiente, por ser mi motor todos los días, y mostrarme como sortear los obstáculos que la vida nos construye sin bajar los brazos...

A mis amigos y compañeros, grandes personas a quienes conocí gracias a esta enorme carrera, gracias por las tardes de mates y estudio, por acompañarme todos estos años, por las charlas, los nervios compartidos...

A Gustavo por trasmitirme todos sus conocimientos, y mostrarme que con esfuerzo y perseverancia todo se logra, gracias por el viaje que dio inicio a este trabajo y por todo el tiempo que trabajamos juntos que me dejó grandes aprendizajes.

A Ariel por la confianza, el acompañamiento en este proyecto, con tu vocación me demostraste como ser una verdadera profesional.

A la Facultad de ciencias Agrarias y forestales, por ser durante todo este tiempo mi segunda casa, un lugar enorme y único, donde entendí que todo esfuerzo tiene su recompensa. Gracias por construir una educación para todos, por acercarnos al campo... la agricultura es el verdadero destino del hombre.

Espero ser una verdadera profesional y poder devolver todo lo que me han dado...

RESUMEN

La producción argentina de arándano ronda las 22.000 Ton, las cuales se destinan fundamentalmente a la exportación como fruta fresca. La fumigación con bromuro de metilo (MeBr) es el tratamiento cuarentenario más comúnmente utilizado para controlar las moscas de los frutos en *berries* destinados a Estados Unidos. Estudios previos han sugerido que aumenta la descomposición y el ablandamiento después del almacenamiento a largo plazo. En este trabajo, se evaluó el uso del inhibidor de la acción del etileno 1-metilciclopropeno (1-MCP) para reducir los efectos perjudiciales causados por MeBr en frutos de arándano. Frutos de los cultivares Jewel y Emerald, con un 100% de color azul superficial, se cosecharon y se sometieron a los siguientes tratamientos: a) control (sin MeBr ni 1-MCP); b) 1-MCP (1 $\mu\text{L L}^{-1}$ 12 h, 2 °C) c) MeBr (32 g m^{-3} , 3 h, 21 °C) y d) 1-MCP + MeBr. La fruta se almacenó 7 o 14 días a 4 °C y posteriormente se determinó la incidencia en el decaimiento, la pérdida de peso, la tasa respiratoria, el color de superficie, las antocianinas, los sólidos solubles, la acidez, el contenido de ácido ascórbico (AA), glutatión (GSH) y la firmeza. La fruta tratada con MeBr mostró después del almacenamiento a largo plazo una mayor incidencia en el decaimiento y una mayor tasa de respiración, siendo estos efectos reducidos por los pretratamientos de 1-MCP. La exposición combinada de 1-MCP + MeBr no causó alteraciones en el color de la superficie, antocianinas, pérdida de peso, sólidos solubles o acidez pero retrasó notablemente el ablandamiento inducido por MeBr. Los resultados muestran que los pretratamientos con 1-MCP mitigan el decaimiento inducido por MeBr en la pérdida de firmeza de los frutos de arándanos.

Los arándanos tratados con MeBr mostraron después de 7 días de almacenamiento una disminución de los contenidos de GSH y AA. A tiempos de almacenamiento más largos, los frutos de la variedad Emerald tratados con 1-MCP + MeBr mantuvieron niveles más elevados de AA que los tratados con MeBr sin tener un pretratamiento con 1-MCP.

INTRODUCCIÓN

Características generales de la planta y el mercado

El arándano es un arbusto perenne perteneciente al género *Vaccinium spp.*, subgénero *cyanococcus*, ubicado taxonómicamente dentro de la familia *Ericaceae*. Dentro de la gran variedad de especies del género, las más cultivadas a nivel mundial corresponden a cuatro grupos: “arándanos altos del norte” (*V. corymbosum*. L); “arándanos bajos” (*V. myrtilloides* Michx. y *V. angustifolium* Aiton), los “ojos de conejo” (*V. ashei* Reade) y los “arándanos altos del sur” correspondientes a híbridos de dos tres y hasta 4 especies diferentes de *Vaccinium spp.* (Caruso y Ramsdell, 2007).

A nivel comercial, los “arándanos altos” son incluidos dentro de conjunto heterogéneo en cuanto a morfología y fisiología denominado comúnmente "frutas finas". La baja vida post-cosecha, el sabor agrídulce y su reducido tamaño, vincula estos frutos en el subgrupo de los *berries*, junto con las frutillas, moras y grosellas llamados también "frutos del bosque" (Kader, 2002; Heredia, 2014;).

Las distintas variedades de arándanos presentan diferentes requerimientos de frío invernal (en referencia al número de horas con temperaturas menores a 7 °C), necesarias para romper el receso invernal y permitir un crecimiento vigoroso de las yemas vegetativas y un correcto desarrollo de las yemas reproductivas. Es esta particularidad la que define las variedades aptas según la latitud geográfica de una región. Por ello, la estación de producción está positivamente correlacionada con la latitud (Heredia, 2014).

Las variedades del “Arándano Alto del Sur” (denominadas en Estados Unidos como "Southern highbush") son las indicadas para climas con veranos cálidos ya que poseen un requisito menor de horas de frío, que varía entre 100 y 400, lo cual permite el cultivo en latitudes bajas como el caso del norte de Chile, Argentina, México, Perú y España. Son

desarrolladas para producción de fruta temprana en zonas de inviernos suaves con baja acumulación de frío y primaveras cálidas (Heredia, 2014).

Las variedades de arándanos altos actualmente cultivadas en Argentina son en orden de importancia: O'Neal, Misty, Biloxi, Blue Crisp, Millenia, Emerald, Jewel, Star, Springhigh, Primadonna, Snowchaser, Abundance, SweetCrisp, San Joaquín, Farthing, Scintilla y Rebel. (Heredia, 2014; Rivadeneira y Kirschbaum, 2010)

A nivel mundial, se encuentran 93.577 hectáreas de arándanos plantadas, correspondiendo un 53% a América del Norte, 19% a América del Sur; 10% a Europa y 16% a Asia y el Pacífico. Para 2012 se produjeron 465.839 toneladas de arándanos, de las cuales 303.906 toneladas fue para consumo en fresco (Brazelton, 2013). El principal país productor de arándanos es Estados Unidos, siendo a su vez el principal importador y consumidor. Chile es el segundo país productor del mundo y Canadá el tercero. A diferencia de Estados Unidos, la mayor parte de la producción canadiense procede de frutos silvestres. Canadá es también el primer país exportador de arándanos congelados. Argentina ocupa el cuarto lugar (Brazelton, 2013). En el Hemisferio Sur, los países que producen arándanos son: Chile, Argentina, Uruguay, Perú, Brasil, Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda (Brazelton, 2013).

En Argentina la difusión del arándano comenzó a principios de la década del 90', sin embargo es a partir de 1994, año en que Estados Unidos habilitó el ingreso del producto argentino, cuando comenzaron a analizarse con mayor interés las posibilidades de producción y exportación (Fabiani *et al.*, 2001). El cultivo de arándano tiene en Argentina una atrayente ventaja, ya que la mayor parte de la producción comienza en Octubre, precisamente cuando el Hemisferio Norte carece de frutos frescos por haber culminado su cosecha. Es por eso que empleando variedades tempranas este país tiene la posibilidad de exportar arándanos a precios competitivos.

La mayor parte de lo exportado se destina a EE.UU. y el resto a Reino Unido, Unión Europea, Asia y otros países. En Argentina la exportación de arándanos ha ido en aumento, superando en el año 2012 las 15.000 toneladas. El incremento en la producción se debió a que hubo productores que se dedicaron a plantar nuevas variedades de arándanos y que a medida que transcurren los años las plantas aumentan su rendimiento por hectárea (APAMA, 2017).

Actualmente la superficie plantada con arándanos asciende a 2.750 hectáreas, con un rendimiento promedio entre los 5.000 y 6.000 kg/ha y una producción nacional que ronda las 22.000 toneladas. Durante los últimos años en nuestro país los arándanos representaron la séptima fruta fresca exportada con un volumen total de 14.610 toneladas. Durante el transcurso de 2017 no tuvo problemas con el clima y las exportaciones se realizaron en tiempo y forma. En materia de precios, la bandeja o *clamshell* de 170 gramos en las góndolas norteamericanas se cotiza entre los 2 y 3 dólares, lo que habla de un buen precio para la fruta exportada (APAMA, 2017).

En Argentina existen tres regiones productoras en orden de importancia: el NEA, el NOA y Bs. As. En el NEA, la producción de arándano se ubica en las provincias de Entre Ríos y Corrientes, con un aporte del 53% de los volúmenes de fruta fresca exportada por el país. En Entre Ríos, el epicentro de producción se encuentra en el departamento de Concordia. La tercera región corresponde a la provincia de Buenos Aires y además hay otras provincias donde existen algunas hectáreas plantadas con arándanos como: Santa Fe, San Luis, Córdoba y Río Negro (APAMA, 2017).

La producción argentina de arándano se destina fundamentalmente a la exportación como fruta fresca para abastecer mercados consumidores del Hemisferio Norte (APAMA, 2016). Por lo que la fruta permanece en tránsito durante una semana o un mes, dependiendo del tipo de flete (aéreo o marítimo) y la distancia al mercado (USA o Europa). Por este motivo, uno de los puntos críticos que afronta el sector productivo es la exigencia de calidad del

arándano en destino final, vinculada principalmente a la pérdida de firmeza y presencia de pudriciones, que no siempre son detectadas en origen. Sin embargo, las exportadoras y recibidores finales clasifican la fruta y aplican descuentos en las liquidaciones proporcionales a la calidad, los cuales representan significativas pérdidas económicas no previsibles hasta que la fruta llega a destino (APAMA 2017).

De las 12.755 toneladas exportadas en el año 2013, el 93% se transportó vía aérea y el resto vía marítima. Transportar un kilogramo de arándanos vía aérea cuesta U\$S 2,50 y vía marítima U\$S 0,80. El transporte es en su mayoría aéreo debido que las bayas experimentan pérdida de calidad a ritmo acelerado desde el momento de la cosecha, asociada con un excesivo ablandamiento, desarrollo de mohos, deshidratación, entre otros. Sin embargo, sólo se justifica el envío aéreo cuando el precio por kilogramo es elevado, la calidad de las bayas en origen es óptima y en ciertas variedades en las que la pérdida de calidad ocurre a menor velocidad (Heredia, 2014). En 2017 los envíos por barco, aumentaron en todos los destinos de exportación: un 25% a USA, un 63% a UK y un 47% a Europa Continental, en comparación al año 2016 (APAMA, 2017).

Tratamientos para extender la vida postcosecha de arándanos

Desde el punto de vista de la fisiología postcosecha, los arándanos son frutos climatéricos (Kader, 2002). Sin embargo, este último punto ha sido largamente discutido, y algunos autores sugieren que depende de la variedad considerada (Connor *et al.*, 2002). Independientemente de su fisiología se trata de frutos altamente perecederos con una vida postcosecha corta que en muchos casos resulta limitante para el acceso a mercados distantes. Dentro de los tratamientos propuestos para aumentar la vida postcosecha de frutos de arándano, se han evaluado diferentes estrategias. A nivel comercial la tecnología más difundida es la refrigeración. En condiciones de almacenamiento a 0°C la vida útil de los frutos puede

alcanzar unas 2 a 3 semanas (Connor *et al.*, 2002). Otras estrategias como las atmósferas modificadas (Zheng *et al.*, 2003), recubrimientos comestibles (Duan *et al.*, 2011), tratamientos con radiación ultravioleta (Perkins-Veazie *et al.*, 2008), aplicaciones de calcio en precosecha (Angeletti *et al.*, 2010), uso de 1-metilciclopropeno y óxido nítrico (Gergoff *et al.*, 2017) se han evaluado pero no se han difundido a nivel comercial en estos frutos.

Comercio y tratamientos cuarentenarios

Del total de arándano exportado por Argentina un 63 % se comercializa a EE.UU., convirtiéndose en el tercer proveedor del mercado estadounidense, seguido de Chile y Canadá (Brazelton, 2013). Sin embargo, para poder vender a ese país los arándanos que no provengan de la región Patagónica, reconocida por el USDA-APHIS-PPQ como área libre de moscas de la fruta, deben fumigarse con bromuro de metilo (MeBr), con el propósito de evitar el ingreso de insectos plaga (Res 601/01 SENASA, 2001). Este procedimiento preventivo afecta negativamente la calidad de las bayas, puesto que éstas permanecen aproximadamente 5 horas a 21 °C, lo que provoca una disminución de la textura y aumento de la incidencia de microorganismos patógenos que se hacen perceptibles durante el transporte o en el país de destino (Heredia, 2014). Sin embargo la eficiencia de este tratamiento ha sido evaluado y el mismo es altamente eficiente en el control de mosca de los frutos (Tebbets y Walse, 2014). Dicha eficiencia no solo ha sido demostrada en arándanos, sino también en otros “berries” como la frutilla contra la mosca del Mediterráneo (Armstrong *et al.*, 1984) y en uva de mesa (Leesch *et al.*, 2008). Debido a lo establecido por el Protocolo de Montreal, el MeBr es un gas cuya producción y utilización se encuentra reglamentada, y muchas alternativas en el manejo postcosecha están siendo evaluadas para su reemplazo (Schneider *et al.*, 2003). Sin embargo el reemplazo del MeBr podría causar grandes pérdidas económicas en el comercio de frutas a nivel internacional (Schneider *et al.*, 2003). Si bien a partir de las restricciones de síntesis en

1991, es muy probable que su uso vaya en descenso, mientras no se encuentren alternativas viables continuara siendo una de las principales herramientas para el control de plagas cuarentenarias en el mercados internacional (Schneider *et al.*, 2003).

A pesar de los beneficios en el control de plagas cuarentenarias que permiten los tratamientos con halogenuros de metilo, se ha descrito que en ciertos casos pueden inducir respuestas de estrés que podrían estar mediadas por el etileno en los frutos. Esto ha sido demostrado en uva de mesa tratada con MeBr (Leesch *et al.*, 2008) y en limón sometido a tratamientos con ioduro de metilo (Liyanage *et al.*, 1993, Ryan *et al.*, 2007).

Señalización e inhibidores de la acción del etileno

Los componentes claves en la señalización del etileno han sido identificados a partir de una simple prueba genética en la cual se ponen a germinar semillas de *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh en la oscuridad, demostrando un comportamiento denominado “triple respuesta”. La triple respuesta se encuentra caracterizada por la inhibición de la elongación del hipocótilo y de la radícula, el hipocótilo es más grueso y el gancho plumular presenta una curvatura exagerada. Muchas poblaciones de *A. thaliana* han sido identificadas a partir de la detección del fenotipo de la triple respuesta (Chen *et al.*, 2005).

Un grupo de 5 receptores que se encuentran en la membrana del retículo endoplasmático rugoso (RER), son los encargados de la señalización y respuesta ante la presencia de etileno. Para actuar, el etileno debe unirse a los receptores. De esta manera, se desactiva la degradación de CTR1 (una proteína clave en la señalización del etileno) y se producen las diferentes cadenas de respuesta que inducen la maduración (Chen *et al.*, 2005).

Dentro del grupo de inhibidores de la acción del etileno, podemos mencionar: dióxido de carbono, tiosulfato de plata (STS) (Cameron y Reid, 1981), aminoetoxi-vinilglicina (AVG) (Aharoni y Lieberman, 1979), 2,5-norbornadieno (2,5-NBD) (Sisler *et al.*, 1985) y

diazociclopentadieno (DACP) (Sisler y Blankenship, 1993a; 1993b). Unos 20 años atrás se desarrolló comercialmente un inhibidor de la acción del etileno, el 1-metilciclopropeno (1-MCP), capaz de lograr los mismos resultados que otros inhibidores a muy bajas concentraciones y sin las desventajas que presentan algunos de éstos (Blankenship y Dole, 2003). El 1-MCP bloquea la acción del etileno, a través de una unión irreversible al receptor de dicha hormona (Sisler y Serek, 1997). En 1999 la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency) aprobó el 1-MCP para el uso en ornamentales bajo el nombre comercial de EthylBloc®. Debido a la baja concentración de aplicación, a la ausencia de acción tóxica se considera un compuesto ambientalmente seguro (Blankenship y Dole, 2003). El 1-MCP está clasificado como un regulador del crecimiento inocuo para el ser humano, demostrando su efecto al retrasar la senescencia de vegetales. El 1-MCP es capaz de disminuir o retrasar la producción de etileno y CO₂ y mantener la firmeza a lo largo de la conservación postcosecha en algunos frutos. El efecto sobre el aumento de la vida postcosecha se ha demostrado principalmente en frutos climatéricos aunque en algunos casos también fue beneficioso en especies o variedades no climatéricas (Martínez Romero *et al.*, 2003). En frutales de pepita su uso a nivel comercial se encuentra difundido. En arándano si bien el 1-MCP mostró algunos efectos favorables (DeLong *et al.*, 2003), los mismos son moderados, por lo que su utilización a nivel comercial es prácticamente nula. De todos modos, es posible hipotetizar que en situaciones de exportación a países libres de moscas de los frutos, en las que se requiera un tratamiento cuarentenario con MeBr, dicha exposición induzca respuestas de estrés deletéreas mediadas por el etileno. En estas condiciones, que por cierto resultan comunes en la producción de arándanos de nuestro país, podría esperarse que la inhibición de la acción del etileno (por ejemplo por empleo de 1-MCP) redunde en beneficios en el mantenimiento de la calidad de los frutos.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

El 1-MCP, como pre-tratamiento antes de la aplicación de bromuro de metilo, mantiene la calidad de los frutos de arándano durante la postcosecha, evitando caídas marcadas en el contenido de antioxidantes, ácidos orgánicos y pérdida de peso y textura.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto del 1-MCP como pretratamiento al MeBr sobre la calidad y la vida postcosecha de frutos de arándano.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto del pretratamiento con 1-MCP previo al MeBr sobre la tasa respiratoria, ataque de hongos, propiedades físicas (deshidratación, color, firmeza), químicas (acidez, sólidos solubles) de arándanos Jewel y Emerald almacenados.
- Evaluar la influencia del pretratamiento con 1-MCP previo al MeBr sobre el contenido antioxidantes (ácido ascórbico (AA), glutatión y antocianinas).
- Evaluar la influencia del pretratamiento con 1-MCP previo al MeBr sobre el contenido de ácidos orgánicos (ácido málico y cítrico).

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y tratamientos

Frutos de plantas de arándanos de las variedades Jewel y Emerald provistos por la empresa BlueBerries Argentina®, fueron cosechados cuidadosamente a partir de plantaciones que se encuentran en la localidad de Concordia, Provincia de Entre Ríos, y se enfriaron a una temperatura entre 5 y 7 °C. Los frutos se colocaron en bandejas tipo *clamshell* de 125 g y se

sometieron a tratamientos con 0.0 (Control) y 1.0 $\mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP (Smartfresh™, Röhm and Hass, USA) por el término de doce horas a una temperatura de 2 °C. Una vez transcurrido ese período de tiempo, las cajas fueron llevadas a la cámara de bromurado para un tratamiento con 0 (Control o Testigo sin MeBr) y 32 g m^{-3} de MeBr a 21 °C por el término de tres horas. Finalizados los tratamientos mencionados se procedió a clasificar los frutos obteniendo cuatro tratamientos: Control, 1-MCP, BrMe y 1-MCP+BrMe. Todo el proceso y durante la postcosecha, se efectuó el monitoreo de las cajas de frutas mediante un adquisidor (UX-100-003, Onset® Computer Corporation, MA, USA).

Ácido ascórbico y glutatión

El contenido de AA se determinó por medio de HPLC de acuerdo con Gergoff *et al.* (2013). Las determinaciones de glutatión se realizaron espectrofotométricamente según Griffith (1980).

Ácidos cítrico y málico

Los contenidos de ácido cítrico y málico se realizaron por medio de HPLC de acuerdo a Romero Rodríguez *et al.* (1992).

Calidad de frutos

Color, firmeza, sólidos solubles, pérdida de peso, pH de los frutos y la acidez se determinaron de acuerdo con Rodoni *et al.* (2010). Para las determinaciones de color se utilizó un colorímetro (Minolta®, CR-400, Osaka, Japón) para obtener los parámetros de L, a* y b*.

Por otro lado se determinó el porcentaje de frutos en decaimiento visible por deshidratación en cada uno de los clamshells de cada tratamiento, junto con la pérdida de peso de acuerdo a indicaciones de Zheng *et al.* (2003) y Angeletti *et al.* (2010) respectivamente.

Parámetros fisiológicos

Respiración: La producción de CO₂ se determinó con un analizador infrarrojo de gases (IRGA) de acuerdo a especificaciones de Maydup *et al.* (2010) a una temperatura constante de 20 °C.

Antocianinas

Las muestras se procesaron en una solución de metanol-HCl en una relación 10:1 respectivamente y se centrifugaron. El sobrenadante se empleó para determinar la absorbancia en el espectrofotómetro (Shimadzu® UV-160A, Japón) a 515 nm. La concentración de antocianinas se expresó en g de cianidina-3-glucósido por kg de fruto fresco utilizando el peso molecular de dicho compuesto y un coeficiente de extinción $\epsilon = 29.000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ de acuerdo a Angeletti *et al.* (2010). Las mediciones se realizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente al azar. Se utilizaron 4 bandejas con 125 gr de fruta por tratamiento y fecha de cosecha. Los datos se presentaron como la media de los resultados obtenidos y se analizaron por medio de ANOVA. Las medias se compararon mediante la prueba de LSD a un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

RESULTADOS

Pérdida de peso, firmeza y decaimiento

En la Figura 1 se observa la evolución de la temperatura, el punto de rocío y la humedad relativa durante los tratamientos de MeBr y posterior almacenamiento a 4 °C. Como se puede

observar, el punto de rocío, siempre se encontró por debajo de la temperatura superficial de los frutos, indicando la ausencia de agua libre sobre los mismos a lo largo de los experimentos.

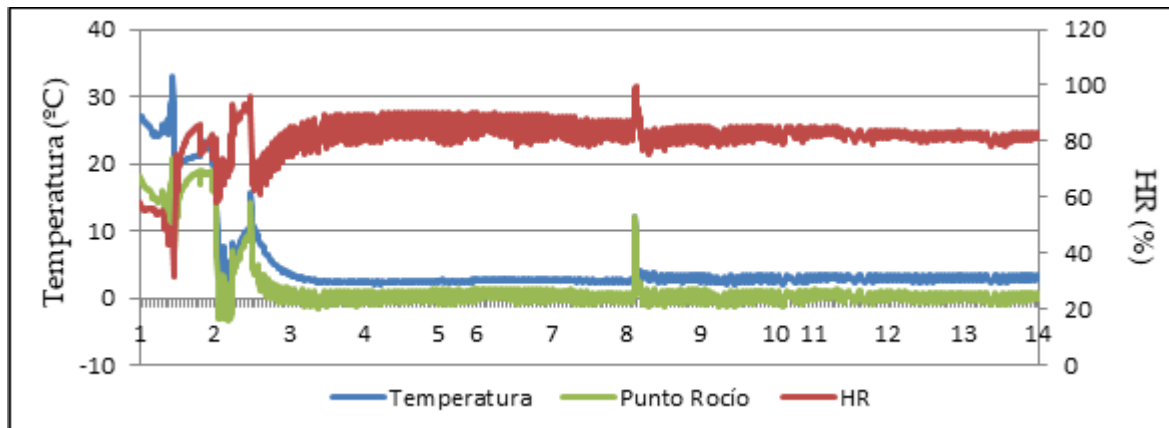


Figura 1. Seguimiento de la temperatura del aire (°C), punto de rocío (°C) y humedad relativa (%) de los frutos a lo largo del tratamiento con MeBr y posterior almacenamiento en cámara a 4 °C.

Como se ha visto en otras variedades, la aplicación de MeBr produce un aumento en la pérdida de peso y en la incidencia de podredumbres de los frutos. En frutos de arándanos del cultivar Bluecropse ha visto que el MeBr (con similares temperaturas y durante 2 h) no tuvo efectos deletéreos en el corto plazo, pero sí compromete la vida postcosecha después de largos períodos de almacenamiento (Thang et al., 2016)

En ambas variedades no se observan diferencias significativas entre tratamientos durante la primera semana en cuanto a la pérdida de peso, llegando a valores del 1% (Figura 2). Luego de dos semanas en los frutos de Emerald todos los tratamientos tendieron a aumentar la pérdida de peso, siendo más notable este aumento en el tratamiento con 1 MCP + MeBr en el que se alcanzaron valores cercanos a 2%, alcanzando diferencias significativas (Figura 2).

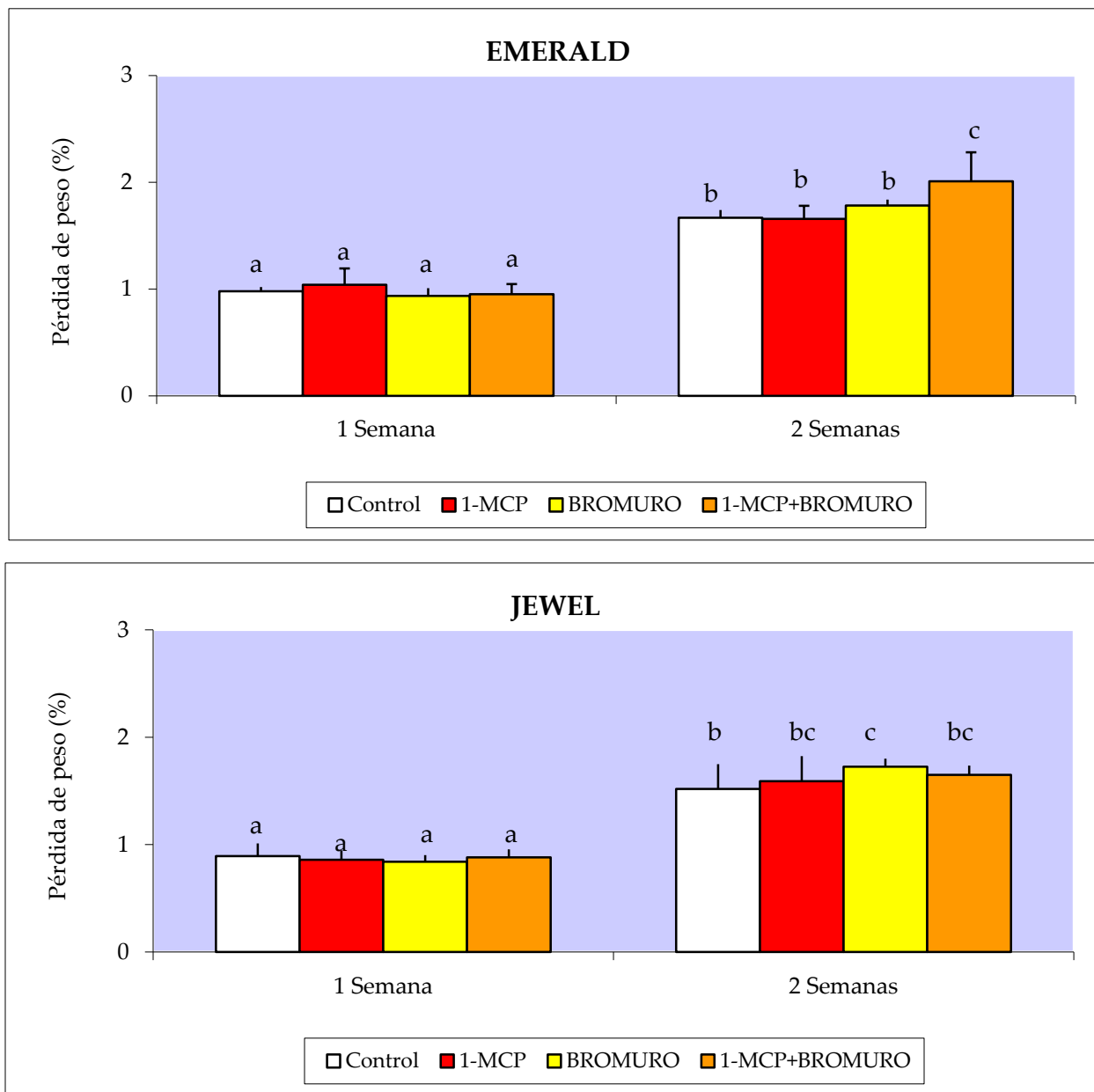


Figura 2. Pérdida de peso en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4°C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

Otros trabajos citan valores dos o tres veces por encima de este porcentaje de pérdida de peso en arándano Bluecrop y O’Neal (Angeletti *et al.*, 2010). Desde el punto de vista de la firmeza las dos variedades analizadas mostraron comportamientos contrastantes. Así, los

valores obtenidos en la variedad Jewel al inicio del tratamiento (961 g cm⁻²) fueron menores en contraste con los frutos de la variedad Emerald (1116 g cm⁻²), indicando que Jewel es una variedad con frutos más blandos (Figura 3).

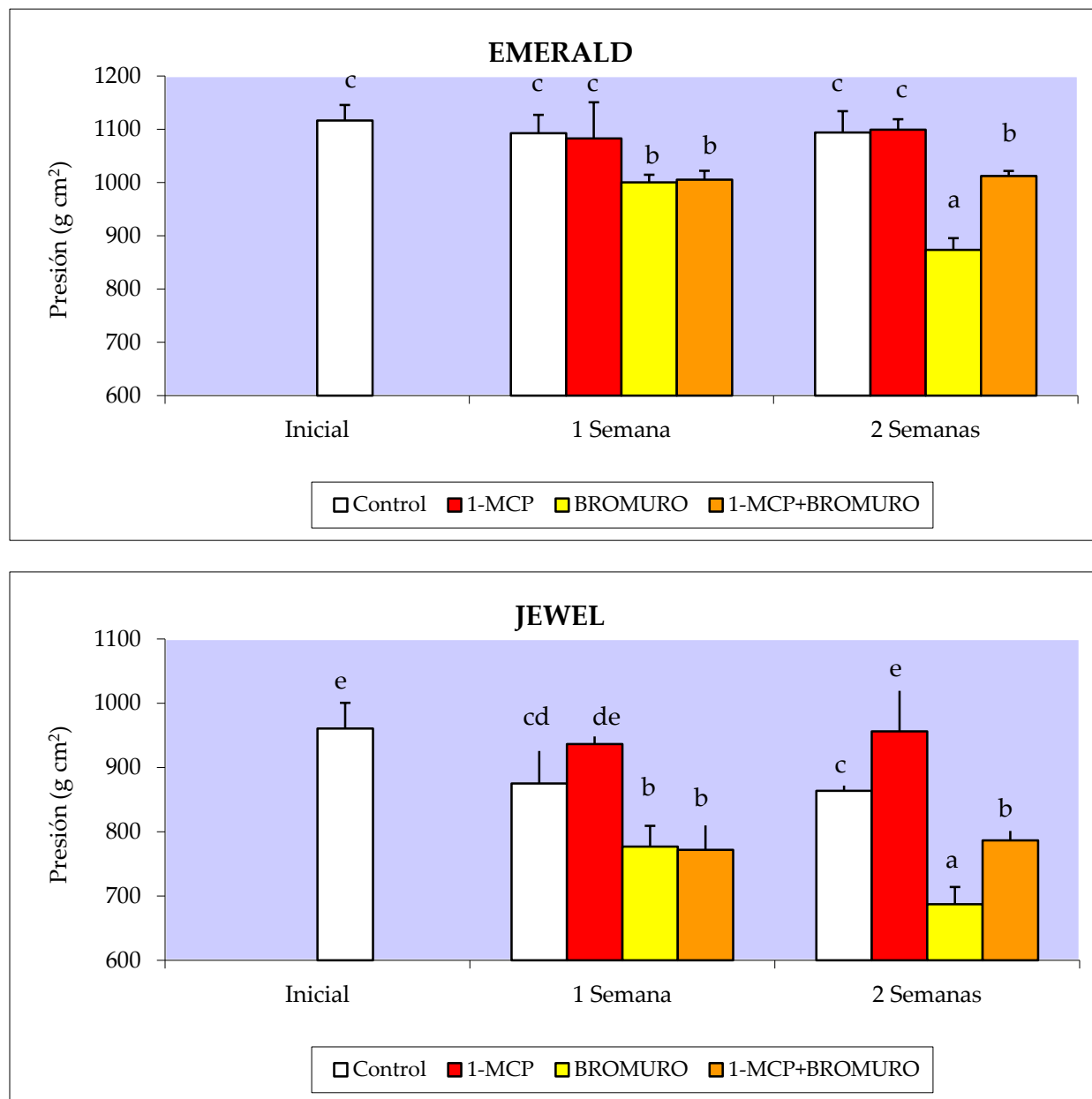


Figura 3. Presión en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4°C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de P<0,05.

En frutos de la variedad Emerald los valores obtenidos de presión en el tratamiento control se mantuvieron constantes durante las dos semanas, sucediendo lo mismo en el tratamiento con 1-MCP. En cambio, en los tratamientos con MeBr, independientemente de que se aplique o no 1-MCP, los valores de presión disminuyeron significativamente al cabo de la primer semana y continuaron su descenso durante la segunda (Figura 3). En el caso de Jewel se observó la misma tendencia, pero con una baja más significativa de la presión, incluyendo al control, que fue disminuyendo lentamente a lo largo del almacenamiento. Los únicos frutos que mantuvieron su firmeza en valores similares al valor inicial son los tratados con 1-MCP + MeBr (Figura 3).

En cuanto al decaimiento, a los 7 días de almacenamiento en frío, no se vieron diferencias entre tratamientos, ni entre variedades, rondando en valores cercanos al 5 % (Figura 4). A los 14 días de almacenamiento la variedad Emerald presentó un elevado decaimiento en los tratamientos con MeBr y 1-MCP + MeBr, mientras que en la variedad Jewel se detectó un aumento del decaimiento en los frutos tratados con MeBr, pero no diferenciándose estadísticamente del control (Figura 4).

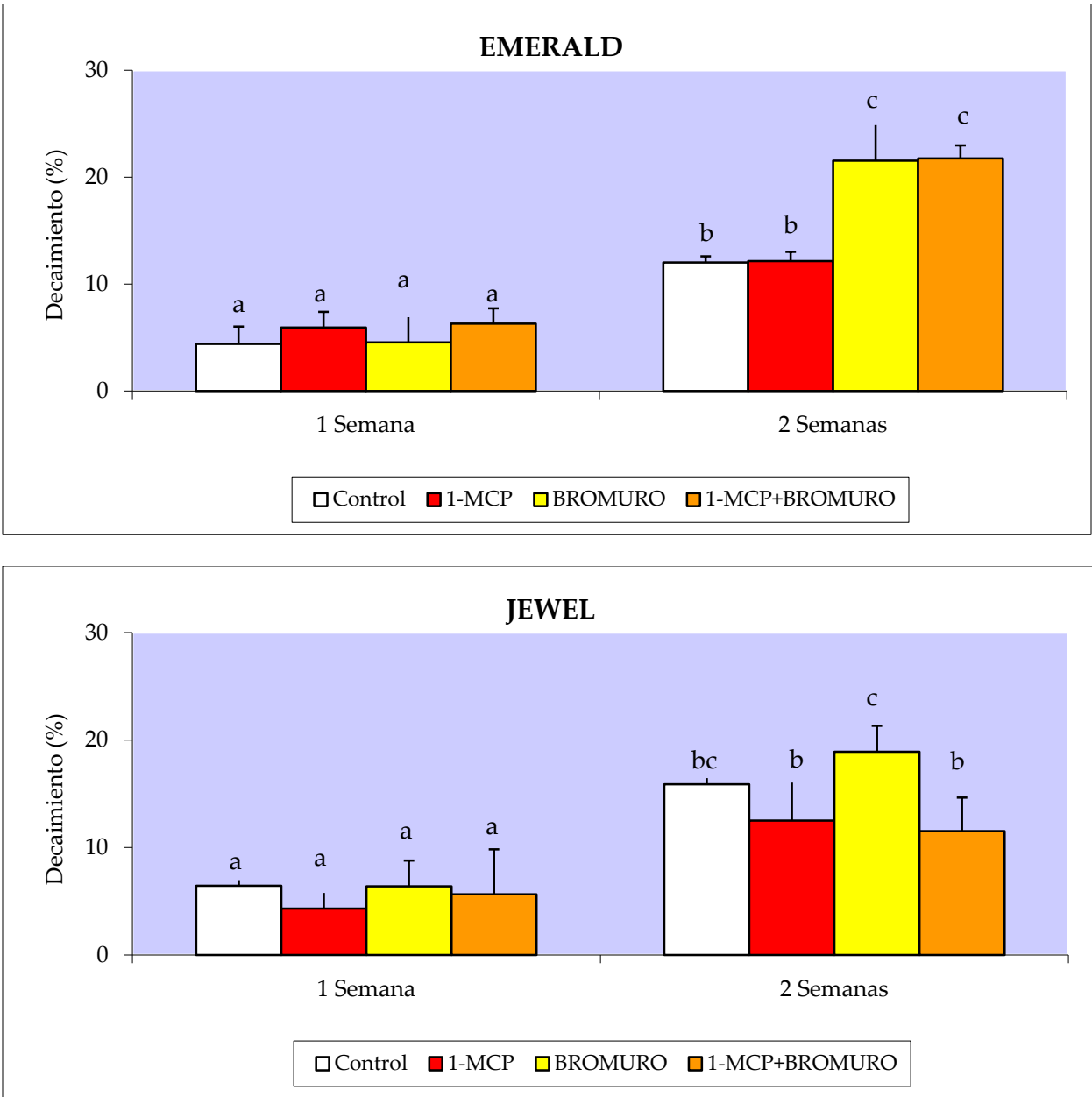


Figura 4. Decaimiento en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4°C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de P<0,05.

Respiración

Dentro de los parámetros fisiológicos de madurez, la tasa respiratoria es uno de los más importantes, sobre todo porque define la vida postcosecha, como es el caso de los arándanos (Song *et al.*, 1992). Para el caso de la variedad Emerald, la tasa respiratoria se mantuvo constante en el control a los 7 días, disminuyendo la misma en el resto de los tratamientos (Figura 5). A los 14 días de almacenamiento en frío, todos los tratamientos siguieron con una tasa descendente, a excepción del tratamiento con MeBr. Por otro lado, la variedad Jewel presentó una misma tendencia a los 7 días, disminuyendo su tasa respiratoria respecto de los valores encontrados al momento de la cosecha y finalmente a los 14 días, esta variedad se comportó de la misma manera que Emerald en cuanto al aumento de la tasa en el tratamiento con MeBr (Figura 5).

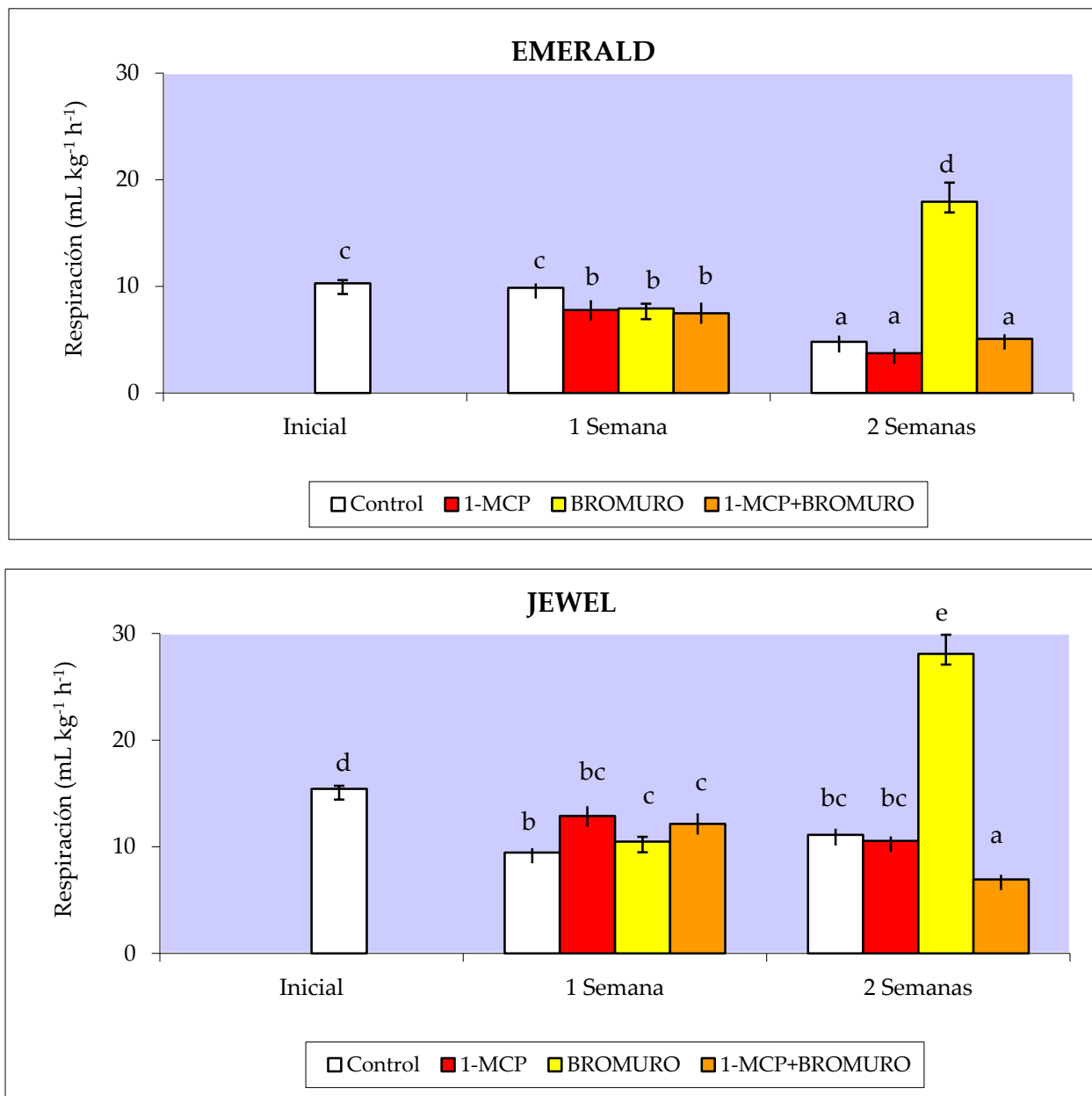


Figura 5. Respiración en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

Sólidos solubles (SS), acidez, pH y color

Dentro de los parámetros de calidad, se evaluaron el contenido de SS, pH y acidez de los frutos. A su vez se realizó un seguimiento del color externo y se determinó el contenido de los principales ácidos orgánicos que se encuentran en mayor abundancia que son el ácido cítrico y

málico (Gergoff *et al.*, 2017). En cuanto al contenido de SS, no se observaron grandes diferencias entre tratamientos ni entre fechas. Ambas variedades presentan valores constantes en este parámetro a lo largo de los experimentos (Tabla 1). En cuanto a los valores de acidez total titulable, solamente se vio una baja en este parámetro en el tratamiento control a los 14 días de almacenamiento a 4 °C en la variedad Emerald y un leve aumento en la variedad Jewel en el tratamiento con 1-MCP + MeBr al mismo tiempo. El resto de los tratamientos de la variedad Emerald presentan un aumento de la acidez total titulable a los 14 días de almacenamiento (Tabla 1). En cuanto a pH no se detectaron grandes diferencias, pero sí una baja del mismo en la variedad Jewel en el tratamiento donde se combinaron 1-MCP y MeBr, cosa que coincide con el aumento de la acidez total titulable (Tabla 1).

Tabla 1. SS (%), acidez total titulable (g ácido cítrico L⁻¹) y pH en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4°C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de P<0,05*.

Emerald		<i>Inicial</i>	<i>1 semana</i>	<i>2 semanas</i>
SS (%)	<i>Control</i>	13,88 (1,08) bc	13,43 (1,35) bc	14,37 (1,39) c
	<i>MeBr</i>		12,77 (1,30) ab	13,75 (1,45) bc
	<i>1-MCP+MeBr</i>		13,42 (1,35) bc	13,88 (1,12) bc
	<i>1-MCP</i>		11,8 (2,47) a	13,68 (0,77) bc
Acidez (g ácido cítrico L ⁻¹)	<i>Control</i>	8,50 (2,94) ab	9,09 (2,79) ab	5,63 (1,68) a
	<i>MeBr</i>		9,55 (3,48) b	10,85 (3,29) b
	<i>1-MCP+MeBr</i>		10,44 (3,24) b	9,85 (1,85) b
	<i>1-MCP</i>		11,04 (5,76) b	9,19 (4,30) b
pH	<i>Control</i>	3,43 (0,22) ab	3,50 (0,21) abc	3,69 (0,29) c
	<i>MeBr</i>		3,49 (2,20) abc	3,35 (0,34) a
	<i>1-MCP+MeBr</i>		3,43 (0,25) abc	3,64 (0,20) bc
	<i>1-MCP</i>		3,48 (0,32) abc	3,63 (0,21) bc
Jewel		<i>Inicial</i>	<i>1 semana</i>	<i>2 semanas</i>
SS (%)	<i>Control</i>	13,2 (1,85) a	12,1 (1,79) a	13,12 (0,67) a
	<i>MeBr</i>		12,91 (1,19) a	13,01 (1,11) a
	<i>1-MCP+MeBr</i>		12,75 (1,77) a	12,82 (1,03) a
	<i>1-MCP</i>		12,85 (1,84) a	14,67 (1,29) b
Acidez (g ácido cítrico L ⁻¹)	<i>Control</i>	9,29 (3,55) bc	7,21 (1,54) ab	8,96 (1,94) ab
	<i>MeBr</i>		8,95 (2,10) ab	8,98 (1,36) ab
	<i>1-MCP+MeBr</i>		8,19 (1,88) ab	11,34 (2,35) c
	<i>1-MCP</i>		8,12 (1,72) ab	6,84 (1,72) a
pH	<i>Control</i>	3,47 (0,27) b	3,69 (0,23) c	3,57 (0,10) bc
	<i>MeBr</i>		3,59 (0,15) bc	3,42 (0,15) ab
	<i>1-MCP+MeBr</i>		3,61 (0,15) bc	3,27 (0,22) a
	<i>1-MCP</i>		3,59 (0,17) bc	3,59 (0,25) bc

*El número entre paréntesis indica el error estándar.

Los contenidos de ácido cítrico y málico presentaron valores erráticos a los 7 días de almacenamiento en ambas variedades (Figura 6).

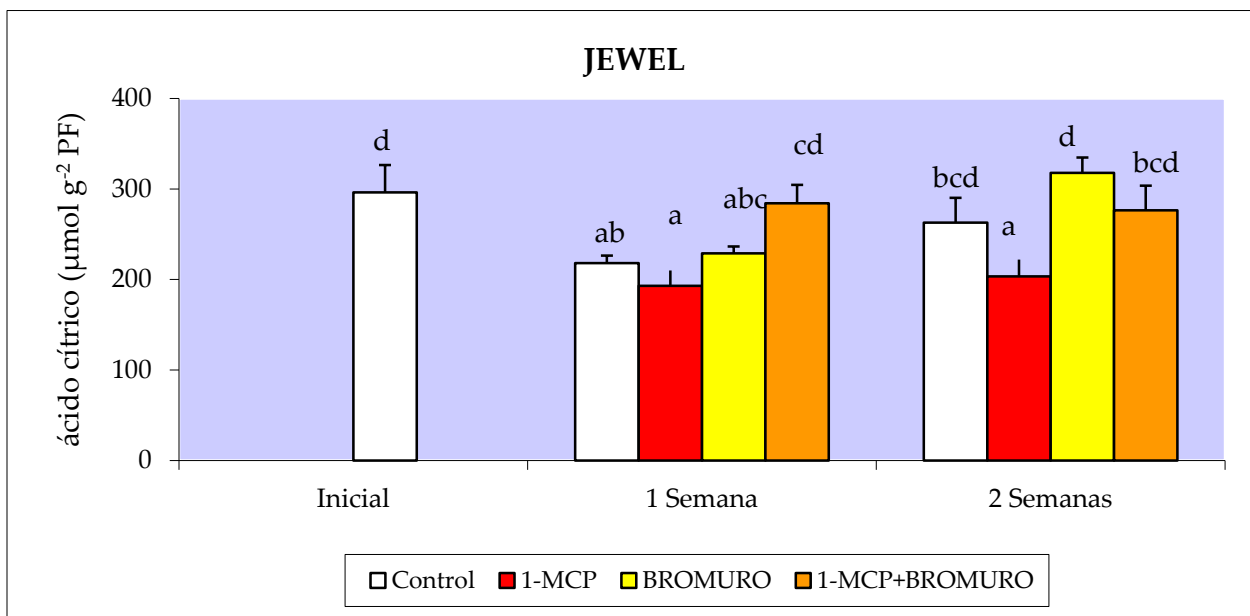
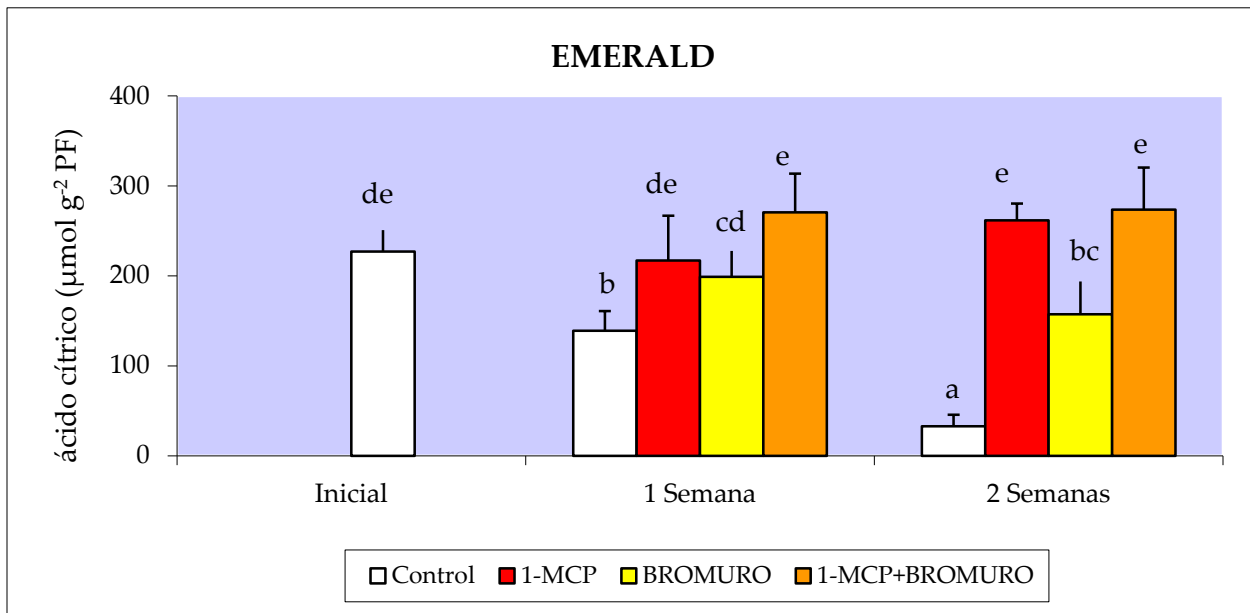


Figura 6. Ácido cítrico en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de P<0,05.

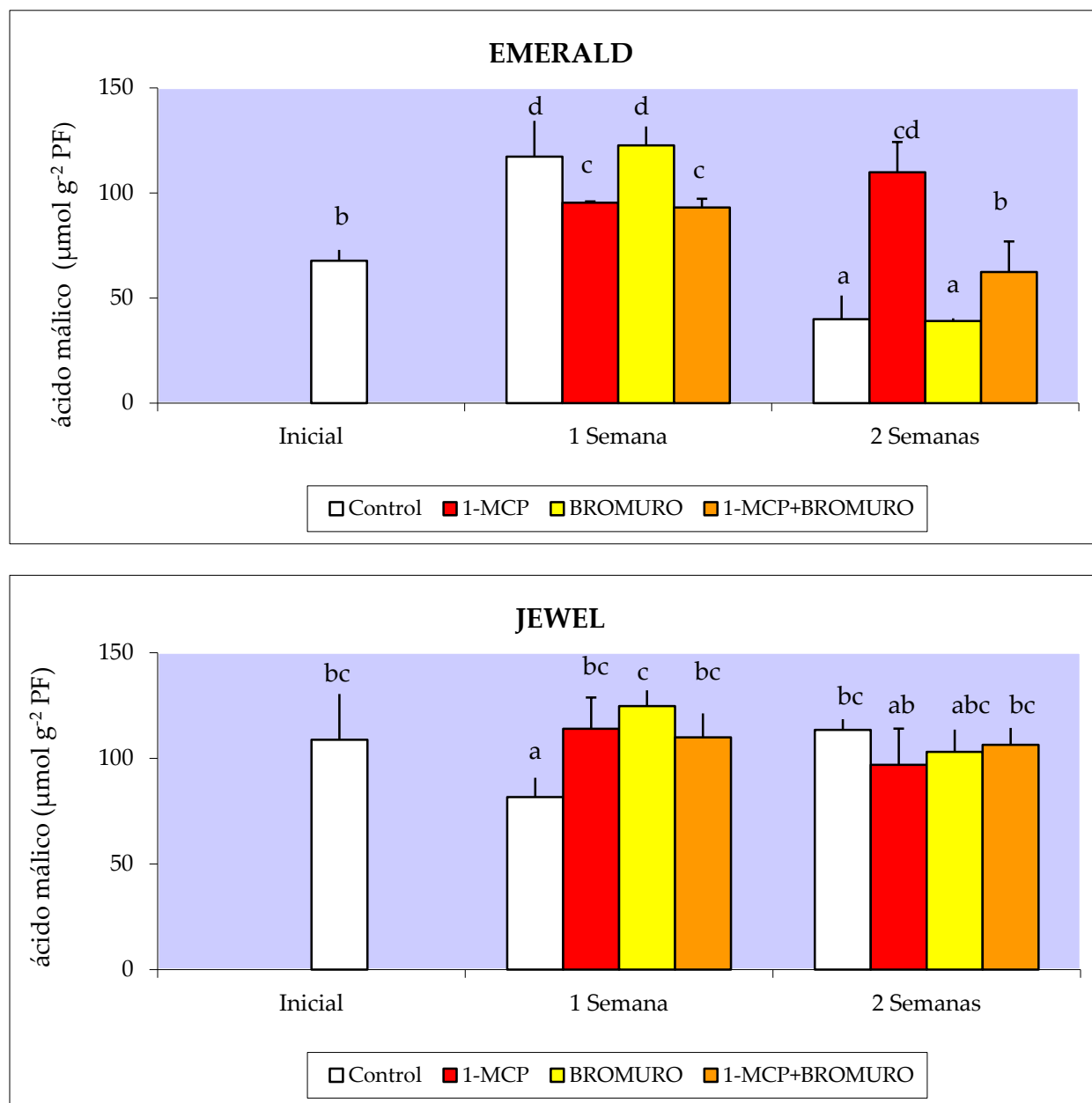


Figura 7. Ácido málico en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

Como se mencionó en el apartado anterior, ambas variedades no presentaron diferencias en el contenido de acidez total titulable en ese tiempo de medición (Tabla 1). A los 14 días, se observó una disminución marcada del control en la variedad Emerald del contenido de ácido cítrico y málico (Figura 6). Sin embargo en el resto de los tratamientos, se ve un incremento de estos ácidos orgánicos, en concordancia con los valores hallados en la acidez total titulable a

los 14 días de almacenamiento en frío (Tabla 1). La variedad Jewel no presentó diferencias significativas a lo largo de los experimentos en el contenido de estos dos ácidos.

En lo que respecta al cambio de color en los frutos de ambas variedades, no se detectaron diferencias en ninguno de los tres parámetros evaluados (L^* , a^* , b^*) (Tabla 2).

Tabla 2. Luminosidad (L^*) y color de superficie (a^* y b^*) en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4°C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05^*$.

		Tiempo a 4°C		
Emerald		<i>Inicial</i>	<i>1 semana</i>	<i>2 semanas</i>
L^*	<i>Control</i>	31,66 (1,80) a	31,94 (3,13) a	31,98 (5,54)a
	<i>MeBr</i>		31,91 (2,02) a	32,04 (2,23)a
	<i>1-MCP+MeBr</i>		31,87 (2,14) a	31,08 (2,20)a
	<i>1-MCP</i>		30,72 (2,76) a	31,14 (2,17)a
a^*	<i>Control</i>	0.07 (0.32) a	0,14 (0,68) a	0,20 (0,57) ab
	<i>MeBr</i>		0,20 (0,61) ab	0,28 (0,64)ab
	<i>1-MCP+MeBr</i>		0,44 (1,15) ab	0,63 (0,99)ab
	<i>1-MCP</i>		0,36 (1,14) ab	0,40 (0,79)ab
b^*	<i>Control</i>	-3,45 (1,13) ab	-3,39 (1,38) ab	-2,88 (1,30) ab
	<i>MeBr</i>		-3,46 (1,09) a	-3,38 (1,54) ab
	<i>1-MCP+MeBr</i>		-3,56 (0,93) ab	-2,80 (1,45) a
	<i>1-MCP</i>		-2,63 (1,70) b	-3,37 (1,01) ab
		Almacenamiento a 4°C		
Jewel		<i>Inicial</i>	<i>1 semana</i>	<i>2 semanas</i>
L^*	<i>Control</i>	31,94 (2,27) b	30,50 (2,19) ab	29,03 (2,52) a
	<i>MeBr</i>		29,80 (1,98) ab	31,02 (2,52) b
	<i>1-MCP+MeBr</i>		30,16 (2,23) ab	30,35 (3,68) ab
	<i>1-MCP</i>		30,73 (2,13) ab	30,29 (3,92) ab
a^*	<i>Control</i>	0,20 (0,44) a	0,10 (0,41)a	0,19 (0,27)a
	<i>MeBr</i>		0,12(0,64)a	0,69 (0,98) b
	<i>1-MCP+MeBr</i>		0,10 (0,39)a	0,36 (0,70)a
	<i>1-MCP</i>		0,25 (0,48)a	0,13 (0,22)a
b^*	<i>Control</i>	-3,83 (2,00) a	-3,18 (1,65) a	-2,79 (1,19) a
	<i>MeBr</i>		-3,06 (1,26)a	-3,25 (1,89) a
	<i>1-MCP+MeBr</i>		-3,25 (1,23)a	-2,75 (1,26) a
	<i>1-MCP</i>		-3,59 (1,29)a	-2,88 (1,03)a

*El número entre paréntesis indica el error estándar.

Ácido ascórbico (AA), glutatión y antocianinas

Dentro de los antioxidantes polares, se evaluó el contenido de antocianinas en ambas variedades no encontrándose diferencias ni entre variedades ni entre tratamientos (Figura 8). Esto concuerda con el resultado hallado en color (Tabla 2).

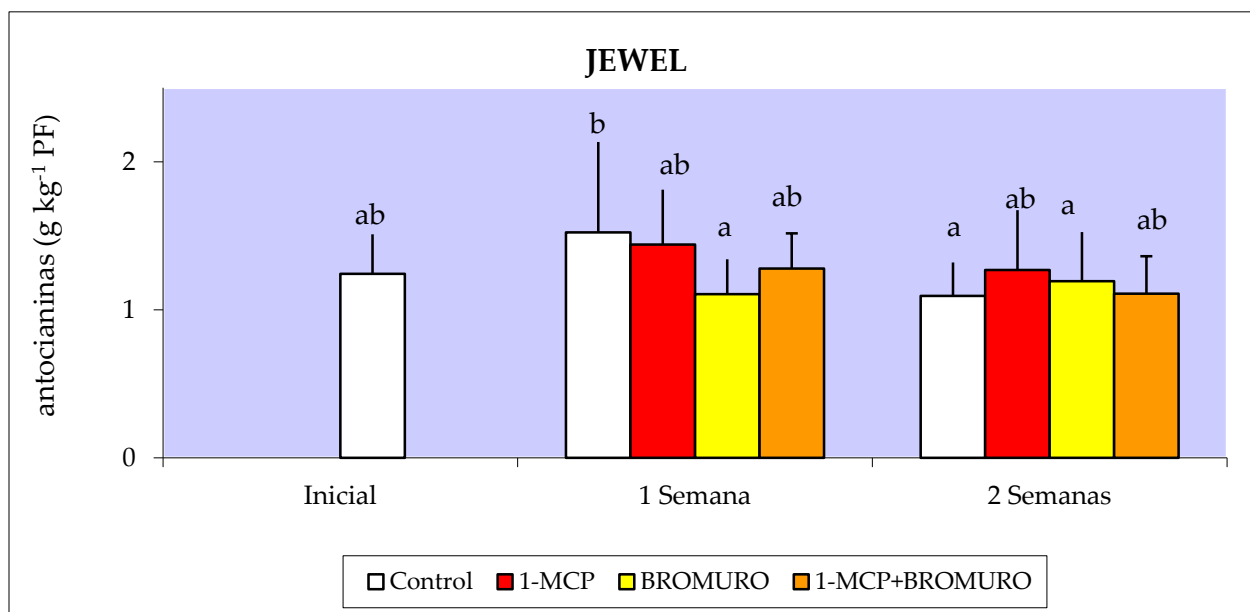
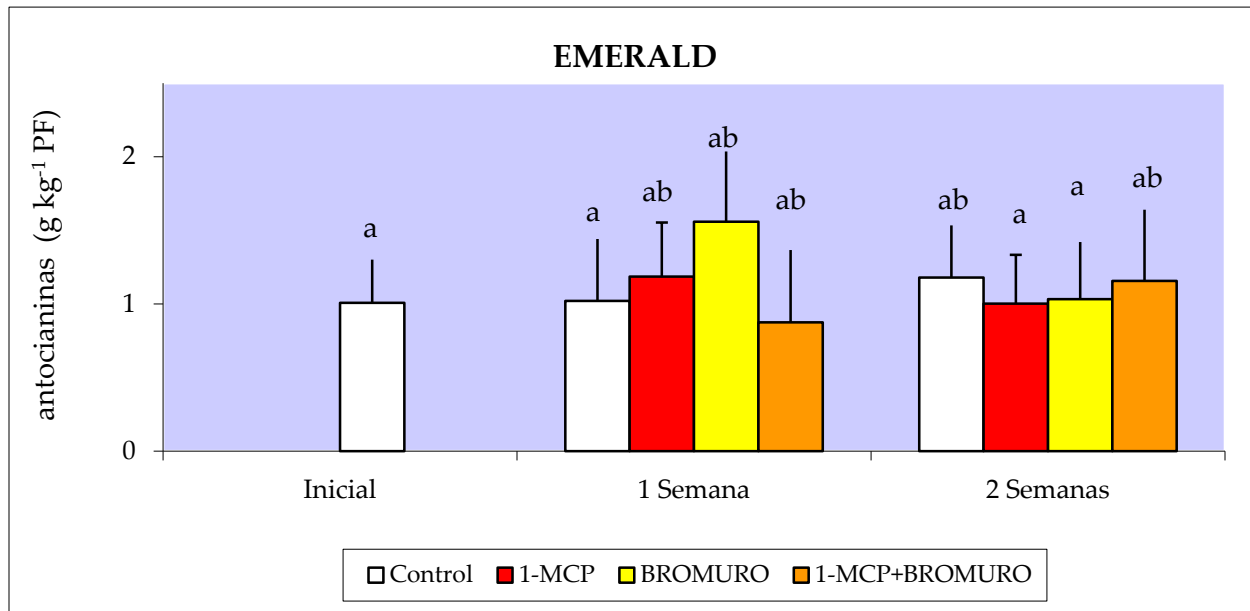


Figura 8. Antocianinas en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

En la variedad Emerald se nota un aumento del contenido de AA de $76,26 \mu\text{mol g}^{-2}$ PF (inicio del tratamiento) a $102,43 \mu\text{mol g}^{-2}$ PF (promedio entre tratamientos a la semana), sin embargo, entre tratamientos no se observaron diferencias significativas. Dos semanas post tratamiento se observó una marcada disminución del valor en el control, y los tratamientos con MeBr y 1 MCP + MeBr, mientras que en el tratamiento de 1 – MCP los cambios no fueron significativos (Figura 9).

En la variedad Jewel al inicio del tratamiento se presentan valores mayores que rondaron los $108 \mu\text{mol g}^{-1}$ PF. En el control y el tratamiento con MeBr los valores fueron similares y no variaron significativamente con el transcurso de las dos semanas del tratamiento. En cambio en los tratamientos con 1-MCP + MeBr y 1-MCP los valores disminuyeron al cabo de una semana de tratamiento, pero tendieron a aumentar en la segunda semana de tratamiento (Figura 9).

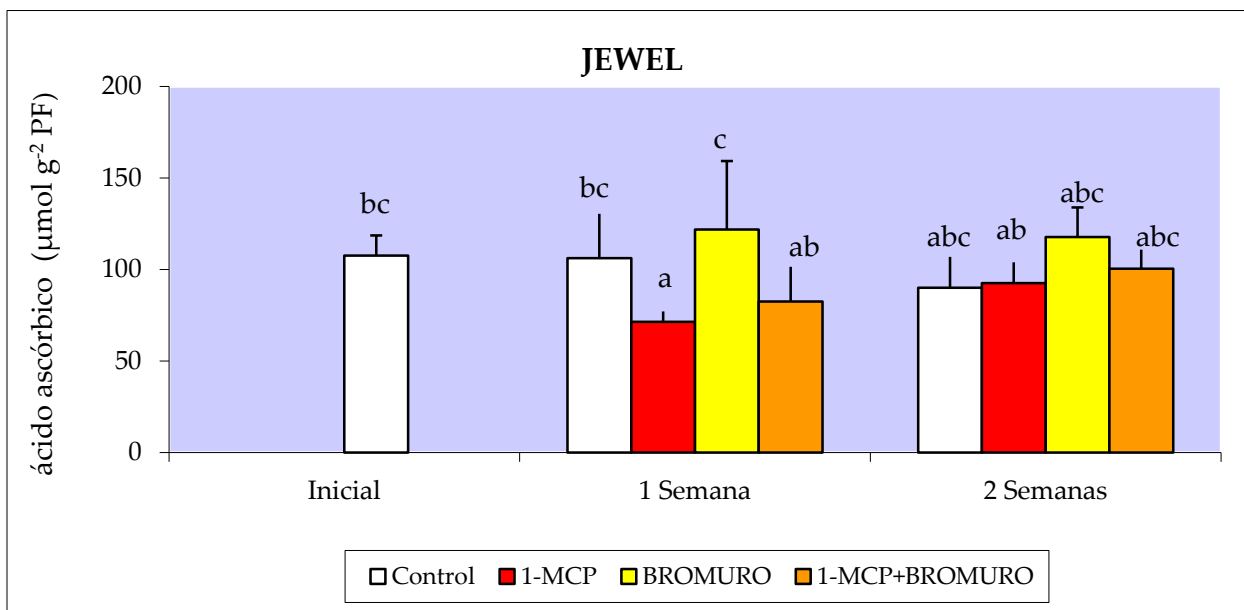
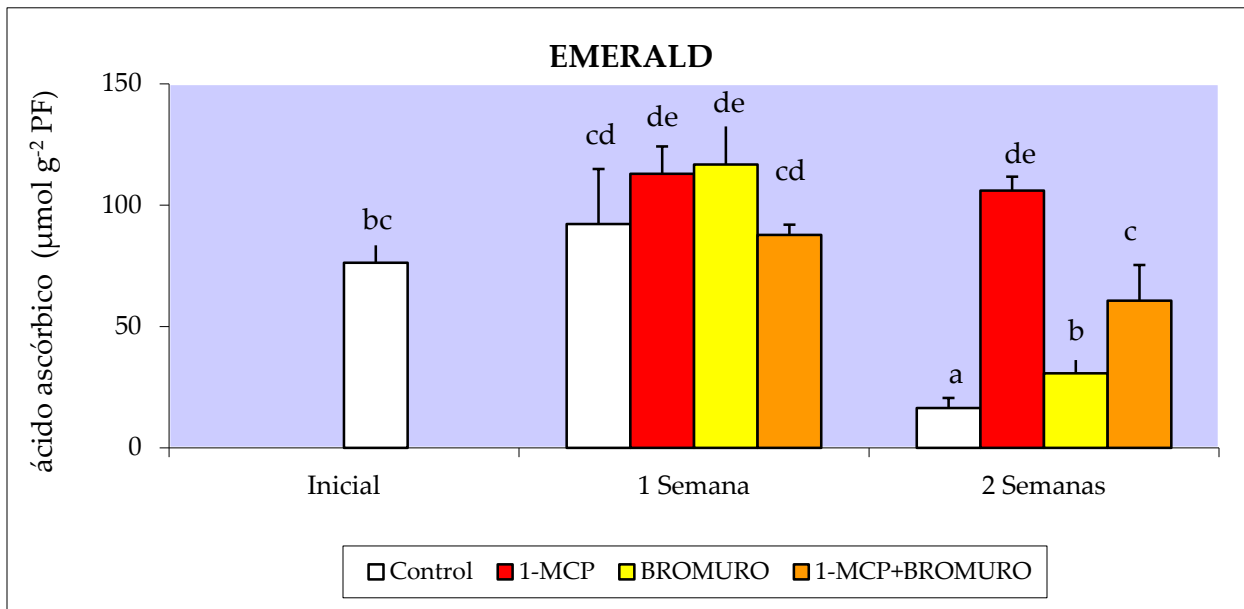


Figura 9. Ácido ascórbico reducido en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

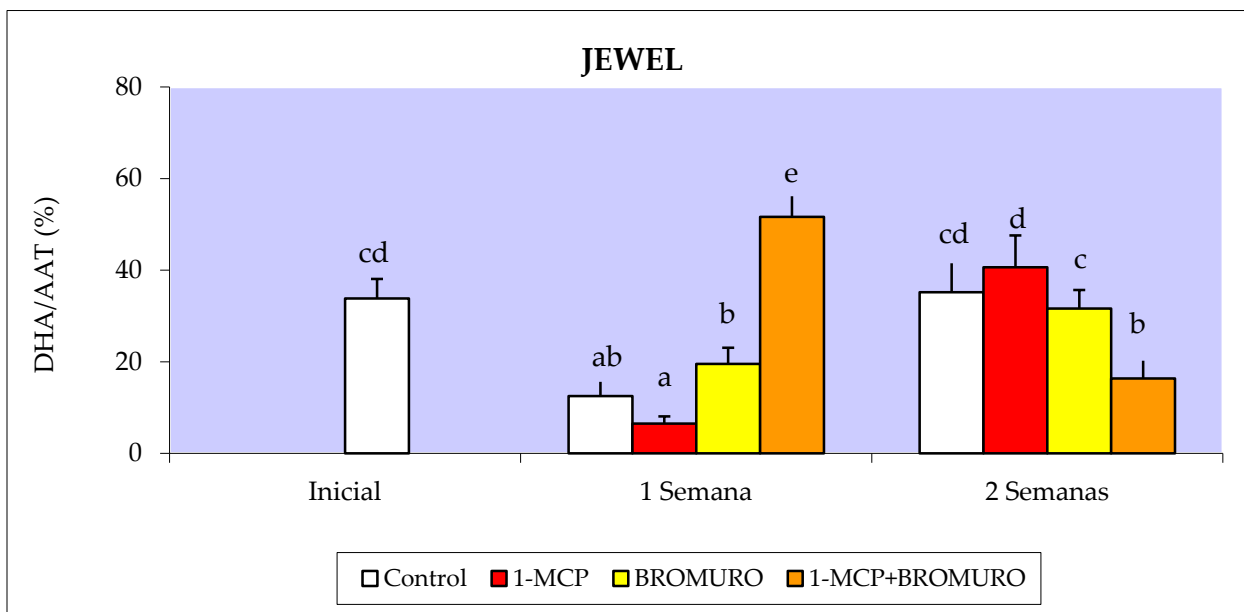
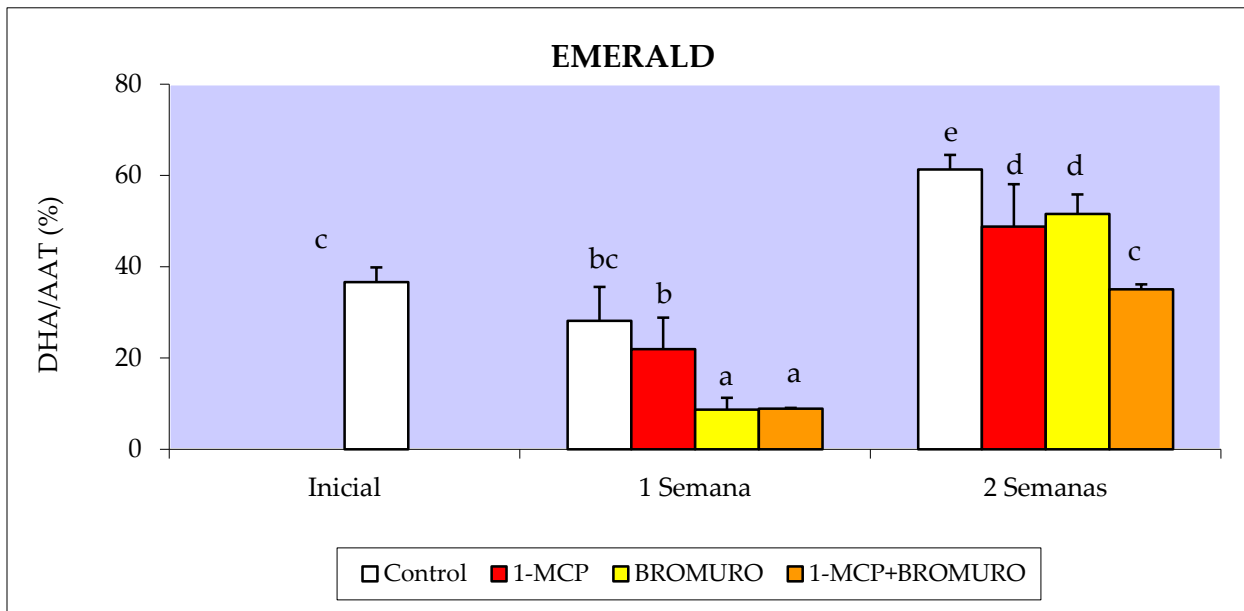


Figura 10. Estado redox del AA en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

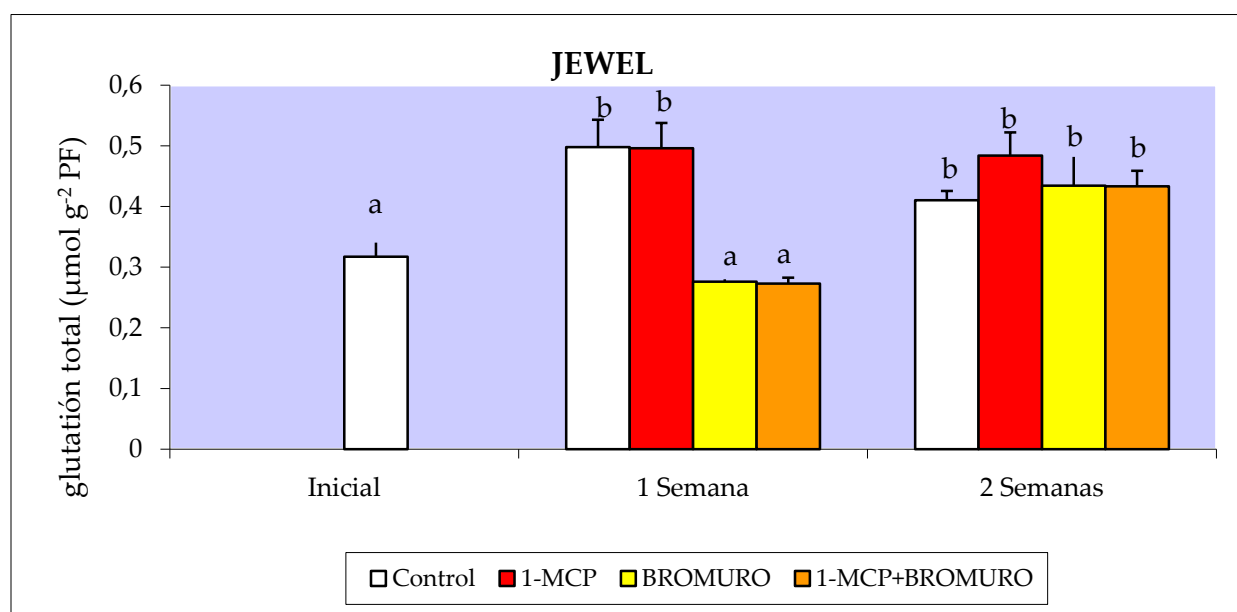
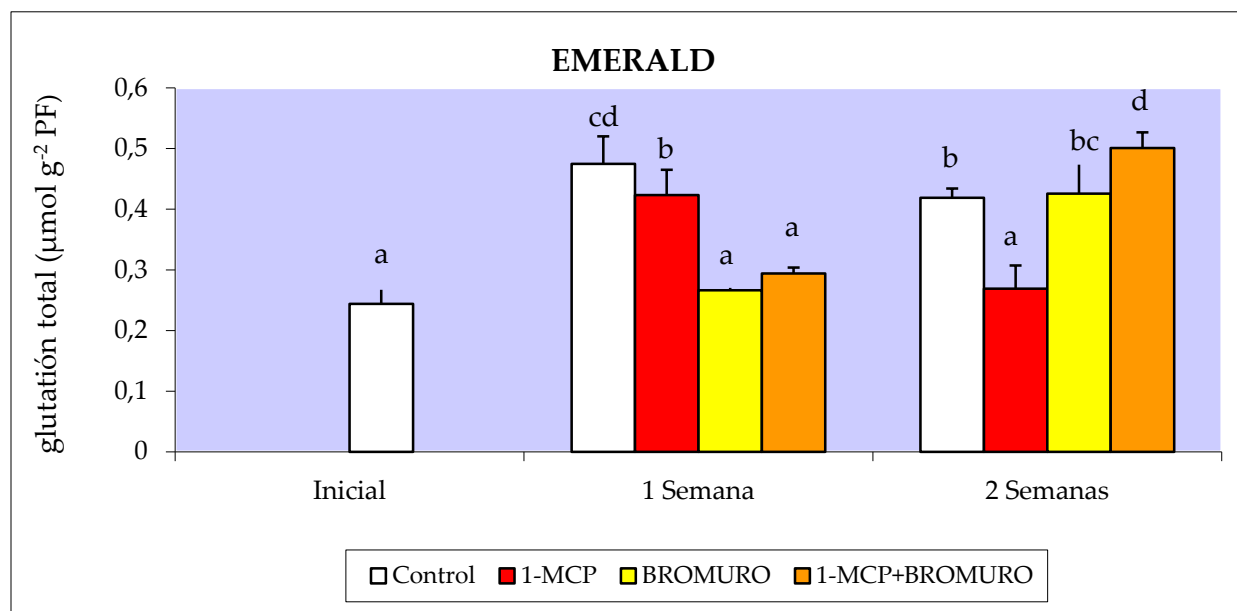


Figura 11. Glutación total en frutos de arándano Jewel y Emerald Control o sometidos a los tratamientos MeBr, 1-MCP + MeBr y 1-MCP y almacenados a 4 °C por 7 y 14 días. Letras diferentes indican diferencias significativas basadas en el test LSD con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

En cuanto al contenido de glutación total, se observó una baja marcada en los tratamientos con MeBr, independientemente de si fueron o no tratados con 1-MCP, cuando los frutos fueron almacenados por el término de una semana. Este efecto se vio con la misma tendencia en ambas variedades y en el mismo momento de muestreo (Figura 11). Sin embargo

a los 14 días de almacenamiento, los tratamientos con MeBr y 1-MCP + MeBr, presentaron un nuevo aumento en el contenido de glutatión total en ambas variedades, a excepción del tratamiento con 1-MCP de la variedad Emerald (Figura 11).

DISCUSIÓN

Decaimiento, respiración y pérdida de peso

La producción de arándanos se ha expandido hasta cinco veces en las últimas dos décadas (FAOSTAT, 2015), debido a que esta fruta además de tener un delicioso sabor y atractivo visual fue reconocida por ser muy rica en antioxidantes (Prior *et al.*, 1998), capaz de prevenir enfermedades crónicas y degenerativas (Yi *et al.*, 2005). La distribución de estos frutos no es una tarea fácil; debido a que es un producto perecedero y posee susceptibilidad a deshidratarse y ablandarse. Por lo tanto, durante las tareas de manejo postcosecha se debería minimizar retrasos y evitar abusos de temperatura (Song *et al.*, 2003). La preparación para el mercado de fruta distribuida en una región fitosanitaria común se basa en el transporte inmediato a la empacadora para su clasificación, envasado y pre enfriamiento (Kader, 2002). En cambio, las bayas destinadas a mercados que tienen restricciones fitosanitarias deben ser sometidas a tratamientos degenerativos que aseguran que el envío esté libre de plagas cuarentenarias dañinas (Follett & Neven, 2006). A pesar de ser un potente gas de efecto invernadero, programado para ser eliminado por el protocolo de Montreal (Heaps, 2006), la fumigación con MeBr es todavía uno de los tratamientos fitosanitarios más comunes y cumple con los requisitos de exportación de la mayoría de los países (TEAP, 2010). El BrMe tiene un amplio espectro de actividad, controlando no solo los insectos, sino también nematodos y microbios patógenos de las plantas (Fields y White, 2002). Un informe reciente sugiere que, en las cerezas y los arándanos, los tratamientos con MeBr pueden causar algunos efectos secundarios perjudiciales, lo que reduce la calidad de la fruta y el potencial de almacenamiento

(Thang *et al.*, 2016). Para evaluar mejor esto en el caso del arándano, se determinaron los efectos de la fumigación con MeBr (21 °C, dosis de MeBr 32 g m⁻³, 3 h) sobre los cambios de calidad durante el almacenamiento. Dado que se ha demostrado que la hormona etileno está involucrada en respuestas a una amplia gama de condiciones de estrés, también se evaluó si un tratamiento con 1-MCP se une de manera competitiva a los receptores de etileno (Sisler y Serek, 1997) teniendo algún efecto beneficioso en el mantenimiento de la calidad de las bayas sometidas a un tratamiento de fumigación común con BrMe, el cual se debe cumplir para el control de las moscas de la fruta.

El decaimiento y la descomposición interna (caracterizada por la pérdida de la compartimentalización de la pulpa de la baya) fueron, junto con un ablandamiento excesivo, los principales síntomas de deterioro observados durante el almacenamiento (Figura 4). Durante la primera semana de almacenamiento no se observaron diferencias en decaimiento y descomposición entre tratamientos. Sin embargo, luego de dos semanas a 4 °C en ambas variedades Jewel y Emerald los frutos sometidos al tratamiento con MeBr, mostraron un mayor porcentaje de daño, que los frutos control no fumigados. Dos horas de exposición al MeBr a una concentración y temperatura similares no tuvieron impacto en los arándanos Bluecrop en tiempos cortos, pero si se comprometió la vida útil en el almacenamiento a largo plazo (Thang *et al.*, 2016). El principal síntoma de deterioro detectado en este caso en la fruta fumigada con MeBr fueron el aumento de la incidencia de mohos. En nectarinas sometidas a tratamientos con MeBr (64 g m⁻³ 2 h, 12 °C) también se informaron una alta incidencia y gravedad de la degradación interna, así como la formación de manchas marrones oscuras en la piel (Harman *et al.*, 1990).

Debido a que antes de ser cosechados los arándanos son bastante sensibles al etileno (Ban *et al.*, 2007) también se sugirió la eliminación de etileno del aire de almacenamiento para reducir el desarrollo de la enfermedad (Mitcham *et al.*, 2002). Sin embargo, los arándanos

cosechados refrigerados post-climaterio producen bajos niveles de etileno durante el almacenamiento (Harman *et al.*, 1990). De acuerdo con DeLong *et al.* (2003) y Chiabrando y Giacalone (2011) en este caso, la inhibición de la percepción del etileno después de la cosecha no tuvo efectos importantes sobre el deterioro de la fruta. En contraste con lo que se encontró en otros estudios el MCP fue efectivo para controlar el deterioro en frutos que fueron posteriormente fumigados con MeBr (Figura 4). En síntesis los resultados confirman que los tratamientos de cuarentena con MeBr aprobados indujeron el deterioro del almacenamiento a largo plazo en los arándanos, incluida la descomposición exacerbada y la descomposición interna, y que estos efectos pueden contrarrestarse inhibiendo la acción del etileno.

La calidad de la fruta va a depender del producto y la concentración del gas aplicado como así también de la temperatura y la duración del tratamiento. El MeBr no causó daños apreciables en el tomate pre climatérico y la manzana. (Drake *et al.*, 1988; Bretch *et al.*, 1986). Por el contrario, en frutos de esparrago la fumigación estimuló la tasa de respiración y la producción de etileno. (Beever *et al.*, 1985). Se ha demostrado una mayor producción de etileno en plantas sometidas a tratamientos fitotóxicos (Simon *et al.*, 1983). Luego de dos semanas de almacenamientos, los arándanos tratados con MeBr mostraron mayores tasas de respiración que los frutos control (Figura 5). En cuanto al daño a las bayas, se mantuvo la respiración más baja en fruta pretratada con 1-MCP. Los resultados muestran que los efectos perjudiciales inducidos por el fumigante están mediados por el etileno. En este escenario, la inhibición de la percepción del etileno puede retrasar los síntomas que promueven la maduración y senescencia.

Pérdida de peso, antocianinas, contenido de ácidos solubles y acidez.

La pérdida de peso en el arándano reduce la calidad post cosecha del fruto al afectar la masa de fruta comercializable y reducir la apariencia visual (Paniagua *et al.*, 2013). La pérdida

de peso aumentó linealmente con el tiempo de almacenamiento a una tasa de 0.11-0.13% día⁻¹, alcanzando 1.5-1.9% en la última fecha de muestreo (Figura 2). Los frutos de Emerald tendieron a mostrar una pérdida de peso mayor que los frutos de Jewel. Ni la fumigación con MeBr ni el tratamiento con 1-MCP afectaron la pérdida de peso de la fruta. Esto coincide con los resultados informados por Chiabrando y Giacalone (2011) quienes reportaron que 1-MCP no causó cambios en la deshidratación de la fruta. Incluso en condiciones en las que la pérdida de peso mostró valores extremos, no se encontraron diferencias entre el control y las bayas tratadas con 1-MCP (Deng *et al.*, 2013). No se observaron cambios en la susceptibilidad de pérdida de peso en el control y tampoco en los arándanos tratados con MeBr a pesar de los daños inducidos por los tratamientos. (Thang *et al.*, 2016).

Los sólidos solubles y la acidez tampoco se vieron afectados por la fumigación con BrMe (Tabla 1). Trabajos previos mostraron algún incremento en el contenido de antocianinas durante el almacenamiento pero se relacionó con una concentración inducida por la pérdida de agua (Kalt y McDonald, 1996). En el presente trabajo, en el cual la pérdida de peso no excedió 1,9%, no se observaron cambios importantes en los contenidos de antocianinas durante el almacenamiento. El stress abiótico, incluido la exposición a MeBr, conduce a la sobreproducción de especies de oxígeno reactivo (ROS) (Gil y Tuteja, 2010) y aceleran la degradación de antocianinas en flores (Pumnuan *et al.*, 2015). Dado que las antocianinas son los antioxidantes más abundantes presentes en el arándano (Prior *et al.*, 1998) evaluamos si pueden verse afectados o no por el tratamiento de MeBr probado. Las bayas tratadas con MeBr con o sin agregado de 1-MCP mostraron una tendencia a tener valores más bajos después de 1 semana de almacenamiento, pero los cambios fueron insignificantes. En la última toma de muestras, se detectó el nivel de antocianina comparable y el color de la superficie en todos los tratamientos (Tabla 2). Los resultados muestran que el tratamiento con 1-MCP antes de MeBr no tiene un efecto importante en las antocianinas, color de la fruta, sólidos solubles y

acidez. Por otro lado el contenido de los ácidos orgánicos cítrico y málico, no mostraron una tendencia concreta en función de los tratamientos y variedades muestreadas.

Ácido ascórbico (AA) y glutatión (GSH)

El mecanismo de la toxicidad del MeBr en las plantas no se ha estudiado en detalle. Por analogía con sistemas de mamíferos, se podría especular que los daños del MeBr son el resultado de a) actividad alquilante en macromoléculas, b) formación de metabolitos tóxicos como metanotiol y formaldehído y c) sobreproducción de especies de oxígeno reactivas (ROS) que dañan proteínas, lípidos, carbohidratos y ácidos nucleicos. (Hallier *et al.*, 1990). El AA y el GSH se consideran dos de los inhibidores celulares más importantes de los radicales libres (superóxido, hidroxilo, peridroxilo y alcoxi) y las formas no radicales (peróxido de hidrógeno y oxígeno singlete) de ROS. Estos metabolitos junto con compuestos fenólicos, aminoácidos no proteicos y α -tocoferoles trabajan en conjunto para controlar las cascadas de oxidación incontrolada y proteger los productos almacenados del daño oxidativo (Gergoff-Grozeff *et al.*, 2013). Después de 7 días de almacenamiento, se encontró una reducción de los contenidos de AA y GSH en las bayas tratadas con MeBr, lo que respalda el papel de estos compuestos en las respuestas de las frutas al tratamiento de cuarentena (Figura 9 y 11). Los niveles de AA en las bayas fumigadas fueron un 10-20% menor en comparación con el control. Una tendencia similar se encontró en el caso de GSH aunque para este compuesto el agotamiento encontrado fue mucho más dramático (50-60%). Además de su capacidad antioxidante, el GSH puede participar en la desintoxicación del haluro de metilo a través de la conjugación de manera dependiente no enzimática. (Hallier *et al.*, 1990). Este último está mediado por la glutatión transferasa (GST, EC 2.5.1.18) que es una línea principal de defensa contra la toxicidad de los compuestos electrófilos. El 1-MCP no pudo evitar las pérdidas de AA o GSH inducidas por el MeBr después de una semana de almacenamiento. Esto sugiere que su efecto inhibitorio de la

acción del etileno sobre la calidad de la fruta no se debió a una mejora en el estado antioxidante de la fruta.

El efecto de los metilos halogenados sobre el contenido de GSH, también se ha visto en limones (Ryan *et al.*, 2007). Estos autores encontraron que limones expuestos a yoduro de metilo, presentaban una disminución del contenido de GSH en estos frutos, de la misma manera que ha ocurrido con los frutos de arándano, tanto de la variedad Emerald y Jewel a los 7 días de almacenamiento en frío.

En síntesis los resultados encontrados en el presente trabajo difieren de trabajos anteriores que indican que la señalización del etileno es necesaria para aliviar el daño causado por productos químicos tóxicos. En plantas de mostaza, la sensibilidad disminuida al etileno resultó en mayores daños a los metales pesados, como el Cd (Asgher *et al.*, 2014). En cambio, una vez cosechado el arándano, el bloqueo de la recepción de etileno tuvo un efecto protector sobre los daños inducidos por MeBr. Una explicación plausible para eso es que la acción principal de 1-MCP en este caso sería retrasar la senescencia o las reacciones que disparan la madurez. Después de 14 días de almacenamiento, los contenidos de AA continuaron cayendo. En este caso, los arándanos Jewel tratados con 1-MCP impidieron las pérdidas del antioxidante.

Firmeza

La calidad de los arándanos disminuye rápidamente después de la cosecha y el ablandamiento es uno de los factores más críticos de deterioro (Paniagua *et al.*, 2013). En consecuencia, cualquier tecnología que pueda ayudar con el mantenimiento de la firmeza después de la cosecha sería de gran beneficio para la industria de los arándanos. Los dos cultivares estudiados en este trabajo mostraron un comportamiento contrastante en términos de pérdida de firmeza. La fruta control de la variedad Jewel mostró una tasa de ablandamiento

relativamente alta, mientras que las bayas de Emerald no evidenciaron cambios significativos durante el almacenamiento (Figura 3). El tratamiento con 1-MCP causó un leve retraso del ablandamiento en Jewel, pero no tuvo efecto en Emerald. Esto difiere del trabajo previo realizado por MacLean y NeSmith (2011) y De Long *et al.*, (2013), quienes encontraron que el tratamiento con 1-MCP no afectó la firmeza del arándano. Los autores señalaron que la falta de inhibición en la maduración de la fruta probablemente estaba relacionada con el hecho de que los arándanos fueron tratados con 1-MCP en una etapa post-climaterio. De todo modos en las bayas tratadas con 1-MCP almacenadas en atmósfera controlada se observó un mejor mantenimiento de la firmeza que en las frutas conservadas en atmósferas controladas sin inhibición de la acción del etileno (Chiabrando y Giacalone, 2012). Los resultados del presente trabajo confirman que las respuestas de arándanos a 1-MCP dependen del cultivar. Cuando las bayas se fumigaron con MeBr, se encontró una mayor tasa de ablandamiento durante el almacenamiento (Figura 3). Después de 1 semana a 4 °C, la fruta fumigada con MeBr resulto más blanda que las bayas control. En la última fecha de muestreo, las diferencias de firmeza entre el control y la fruta tratada con MeBr fueron aún mayores. La fruta sometida a tratamientos 1-MCP + MeBr fue ligeramente más blanda que el control, pero permaneció mucho más firme que los arándanos tratados con MeBr que no recibieron 1-MCP. Esto muestra que el etileno es responsable de parte del ablandamiento inducido por la fumigación con MeBr. Se ha sugerido que la pérdida de humedad es la principal causa del cambio de firmeza en el arándano almacenado (Paniagua *et al.*, 2013). La pérdida de firmeza registrada en el presente estudio incluso en ausencia de diferencias en la pérdida de peso sugiere que la degradación de la pared celular puede ser causada por un importante ablandamiento postcosecha del arándano que se produce en condiciones de HR alta.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se evaluó el efecto de la fumigación con MeBr sobre la calidad de los arándanos (variedades Jewel y Emerald). También se estudió el efecto inhibitorio en la acción del etileno (1-MCP) en bayas pretratadas con MeBr. La fruta tratada con MeBr mostró mayor decaimiento y una mayor tasa de respiración después del almacenamiento a largo plazo. Estos efectos fueron reducidos por pretratamientos con 1-MCP. El tratamiento combinado de 1-MCP + MeBr no afectó el color de la fruta, las antocianinas, la pérdida de peso, el contenido de sólidos solubles y la acidez. Los arándanos tratados con MeBr mostraron después de 7 días de almacenamiento una disminución de los contenidos de GSH y AA, lo que sugiere que estos compuestos pueden estar involucrados en la protección de la fruta contra la toxicidad del MeBr. Después del almacenamiento a largo plazo, la fruta de la variedad Emerald tratada con 1-MCP + MeBr también mantuvo un AA más alto que las bayas fumigadas sin 1-MCP. El tratamiento combinado 1-MCP + MeBr retrasó notablemente el ablandamiento inducido por MeBr. Los resultados muestran que los pretratamientos con 1-MCP mitigan el decaimiento inducido por MeBr, en la pérdida de firmeza del fruto de arándano.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Aharoni, N. & Lieberman, M.** 1979. Ethylene as a regulator of senescence in tobacco leaf discs. *Physiol. Plant.* 64, 801-804
- Angeletti, P., Castagnasso, H., Miceli, E., Terminello, L., Concellón, A., Chaves, A. & Vicente, A.R.** 2010. Effect of preharvest calcium applications on postharvest quality, softening and cell wall degradation of two blueberry (*Vaccinium corymbosum*) varieties. *Postharvest Biol. Technol.* 58, 98-103.
- APAMA.** 2016. Censo APAMA 2013. Disponible en: <http://www.apama.com.ar>. [Último acceso agosto de 2016].
- APAMA.** 2017. Disponible en: <http://www.apama.com.ar>. [Último acceso febrero 2018].
- Armstrong, J. W., Schneider, E. L., Garcia, D. L. & Couey, H. M.** 1984. Methyl bromide quarantine fumigation for strawberries infested with Mediterranean fruit fly (Diptera: *Tephritidae*). *J. Econ. Entomol.* 77, 680-682.
- Asgher, M., Khan, N. A., Khan, M. I. R., Fatma, M. & Masood, A.** 2014. Ethylene production is associated with alleviation of cadmium-induced oxidative stress by

- sulfur in mustard types differing in ethylene sensitivity. *Ecotoxicol. Environ Saf.* 106, 54–61.
- Ban, T., Kugishima, M., Ogata, T. & Ueda, H.** 2007. Effect of ethephon (2-chloroethylphosphonic acid) on the fruit ripening characters of rabbiteye blueberry. *Sci. Hort.* 112, 278-281.
- Beever, D. D. J, Yearsley, C. W. & Hogg, M. G.** 1985. Effect of post-harvest fumigation on quality of asparagus spears. *New Zeal.J. Agric. Res.* 28, 537-543.
- Blankenship, S. M. & Dole, J. M.** 2003. 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharvest Biol. Technol.* 28, 1-25
- Brazelton, C.** 2013. 2012 World blueberry acreage & production. February, 2013. North American Blueberry Council. Disponible:http://www.chilealimentos.com/2013/phocadownload/Aprocesa_dos_congelados/nabc_2012-world-blueberry-acreage-production.pdf [Último acceso febrero de 2018]
- Brecht, J. K., Huber, D. J., Sherman, M. & Lee, J.** 1986. Methyl bromide inhibits ripening and ethylene production in tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) fruit. *J. Plant Growth Reg.* 5, 29-35.
- Cameron, A. C. & Reid, M. S.** 1981. The use of silver anionic complex as a foliar spray to prevent flower abscission of *Zygocactus*. *HortSci.* 16, 761–762
- Caruso, F.L. & Ramsdell, D.C.** 2007. *Compendium of blueberry and cranberry diseases*. 2° Ed. APS Press. 87 pp.
- Chen, Y. F., Etheridge, N. & Schaller G. E.** 2005. Ethylene signal transduction. *Ann. Bot.* 95, 901–915
- Chiabrando V. & Giacalone G.,** 2012. Effect of antibrowning agents on color and related enzymes in fresh-cut apples during cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36: 133-140
- Chiabrando, V. & Giacalone, G.** 2011. Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclopropene. *Food Chem.* 126, 1812-1816,
- Connor, A. M., Luby, J. J., Hancock, J. F., Berkheimer, S. & Hanson, E. J.** 2002. Changes in fruit antioxidant activity among blueberry cultivars during cold-temperature storage. *J. Agric. Food Chem.* 50, 893-898.
- DeLong, J. M., Prange, R. K., Bishop, C. & Harrison, P. A.** 2003. The influence of 1-MCP on shelf-life quality of highbush blueberry. *HortSci.* 38, 417-418
- Deng, J., Shi, Z., Li, X. & Liu, H.** 2013. Effects of cold storage and 1-methylcyclopropene treatments on ripening and cell wall degrading in rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei*). *Food Sci. Technol Int.* 20, 287–298.
- Drake, S. R., Moffitt, H. R., Fellman, J. K. & Sell, C. R. J.** 1988. Apple quality as influenced by fumigation with methyl bromide. *Food Sci.* 53, 1710–1712.
- Duan, J., Wu, R., Strik, B.C. & Zhao, Y.** 2011. Effect of edible coatings on the quality of fresh blueberries (Duke and Elliot) under commercial storage conditions. *Postharvest Biol. Technol.* 59, 71-79.
- Fabiani, A., Martinez, C. & Carlazara, G.** 2001. Cultivo del Arándano en la zona del Río Uruguay. IDIA XXI.:1: 105-111.
- FAOSTAT.** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Web. <http://faostat.fao.org/default.aspx>. Citation key. FAO, 2015. Datasheets. Blueberries.

- Fields, P. G. & White, N. D.** 2002. Alternatives to methyl bromide treatments for stored-product and quarantine insects. *Annu. Rev. Entomol.* 47, 331-359.
- Follett, P. A. & Neven, L.** , 2006. Current trends in quarantine entomology. *Annu. Rev. Entomol.* 51, 359-385.
- Gergoff Grozeff, G. E., Alegre, M., Senn, M.E., Chaves, A. R., Simontacchi, M. & Bartoli, C. G.**, 2017. Combination of nitric oxide and 1-MCP on postharvest life of the blueberry (*Vaccinium sp.*) fruit. *Postharvest Biology and Technology* 133: 72-80.
- Gergoff Grozeff, G. E., Chaves, A. R & Bartoli, C. G.** 2013. Low irradiance pulses improve postharvest quality of spinach leaves (*Spinacia oleracea* L. cv Bison). *Postharvest Biol. Technol.* 77, 35-42.
- Gill, S. S. & Tuteja, N.** 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48, 909–930.
- Griffith, O. W.** 1980. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine. *Anal. Biochem.* 106: 207–212.
- Hallir, E., Deutschmann, S., Reichel, C., Bolt, H. M & Peter, H.** 1990. A comparative investigation of the metabolism of methyl bromide and methyl iodide in human erythrocytes. *Int. Arch. Occup. Environ. Health.* 62, 221-225.
- Harman, J.E., Lay-Yee, M., Billing, DP., Yearsley, CW. & Jackson, PJ.** 1990. Fruit effects of methyl bromide fumigation, delayed cooling, and controlled atmosphere storage on the quality of 'Redgold' and 'Fantasia' nectarine fruit 1990. *N. Zeal. J. Crop & Hort. Sci.* 18, 197-203.
- Heaps, J. W.** 2006. Insect management for food storage and processing. Second edition. AACC International, St Paul, Minnesota, USA.
- Heredia, A.N.** 2014. Evaluación de prácticas de manejo que influyen la calidad postcosecha de frutas de arándanos de la Región de Salto Grande, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Entre Ríos. Facultad de Ciencias de la Alimentación. Defensa: Junio de 2014. 217 pp.
- Kader, A.A.** 2002. Postharvest biology and technology: an overview. En: Kader, A.A. (Ed.), *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, Publication 3311. University of California Agriculture and Natural Resources, pp. 39–47.
- Kalt, W. & McDonald, J. E.** 1996. Chemical composition of lowbush blueberry cultivars. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121, 142–146.
- Leesch, J.G., Smilanick, J.L. & Tebbets, S.** 2008. Methyl bromide fumigation of packed table grapes: Effect of shipping box on gas concentrations and phytotoxicity. *Postharvest Biol. Technol.* 49, 283-286.
- Liyanage, C., Luvisi, D. A. & Adams, D. O.** 1993. The glutathione content of grape berries is reduced by fumigation with methyl bromide or methyl iodide. *Am. J. Enol. Vitic.* 44, 8-12.
- MacLean, DD. & NeSmith, S.** 2011. Rabbiteye blueberry postharvest fruit quality and stimulation of ethylene production by 1-methylcyclopropene *HortSci.*46, 1278–1281.
- Martínez Romero, D., Dupille, E., Guillén, F., Valverde, J.M., Serrano, M. & Valero, D.** 2003. 1-Methylcyclopropene increases storability and shelf life in climacteric and nonclimacteric plums. *J. Agric. Food Chem.* 51, 4680-4686.

- Maydup, M. L., Antonietta, M., Guiamet, J. J., López, J. R. & Tambussi, E. A.** 2010. The contribution of ear photosynthesis to grain filling in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res.* 119, 48-58.
- Mitcham, E.J., Crisosto, C. & Kader, A.A.** 2002. Bushberries: Recommendations for maintaining postharvest quality. www.ucanr.edu/sites/Postharvest_Technology_Center_/CommodityResources/Fact_Sheets/Datastores/Vegetables_English/?uid=19&ds=799 (último acceso noviembre de 2017).
- Paniagua, A., East, A., Hindmarsh, J. & Heyes, JA.** 2013. Moisture loss is the major cause of firmness change during postharvest storage of blueberry. *Postharvest Biol. Technol.* 79,13-19.
- Perkins-Veazie, P., Collins, J.K. & Howard, L.** 2008. Blueberry fruit response to postharvest application of ultraviolet radiation. *Postharvest Biol. Technol.* 47, 280-285.
- Prior, R. L., Cao, G., Martin, A., Sofic, E., McEwen, J., O'Brien, C., Lischner, N., Ehlenfeldt, M., Kalt, W., Krewer, G. & Mainland, C. M.** 1998. Antioxidant capacity as influenced by total phenolic and anthocyanin content, maturity, and variety of *Vaccinium* species. *J. Agric. Food Chem.* 46, 2686-2693.
- Pumnuam, J., Khurnpoon, L. & Insung, A.** 2015. Effects of insecticidal essential oil fumigations on physiological changes in cut Dendrobium Sonia orchid flower. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 37, 523-531
- Rivadeneira, M. F. & Kirschbaum, D. S.** 2010. INTA - Programa Nacional Frutales - Cadena arándano. Disponible on-line: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-cadena_arandano.pdf [Último acceso agosto de 2017].
- Rodoni, L., Casadei, N., Concellón, A., Chaves, A.R. & Vicente, A.R.** 2010. Effect of short-term ozone treatments on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit quality and cell wall degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58: 594-599
- Romero Rodriguez, M.A., Vazquez Oderiz, M.L., Lopez Hernandez, J. & Sinal Lozano, J.** 1992. Determination of vitamin C and organic acids in various fruits by HPLC. *J. Chromat. Sci.* 30, 433-437
- Ryan, F.J., Leesch, J.G., Palmquist, D.E. & Aung, L.H.** 2007. Glutathione concentration and phytotoxicity after fumigation of lemons with methyl iodide. *Postharvest Biology and Technology* 45: 141-146.
- Schneider, S.M., Roskopf, E.N., Leesch, J.G., Chellemi, D.O., Bull, C.T. & Mazzola, M.** 2003. United States Department of Agriculture—Agricultural Research Service research on alternatives to methyl bromide: pre-plant and post-harvest. *Pest Man. Sci.* 59, 814-826
- SENASA,** Res 601/01. 2001. Disponible online: <http://www.loa.org.ar/legNormaDetalle.aspx?id=9921> (ultimo acceso; febrero 2018)
- Simon, J. E., Decoteau, D.R. & Craker, L. E.** 1983. Detection of phytotoxic compounds using stress-induced ethylene and ethane. *Env. Technol. Lett.* 4, 157-162.
- Sisler, E. C. & Serek, M.** 1997. Inhibitors of ethylene responses in plants at the receptor level: recent developments. *Physiol. Plant.* 100, 577–582.

- Sisler, E.C. & Blankenship, S.M.** 1993a. Diazocyclopentadiene (DACP), a light sensitive reagent for the ethylene receptor in plants. *Plant Growth Regul* 12, 125–132
- Sisler, E.C. & Blankenship, S.M.** 1993b. Effect of diazocyclopentadiene on tomato ripening. *Plant Growth Regul* 12: 155–16
- Sisler, E.C., Goren, R. & Huberman, M.** 1985. Effect of 2,5-norbornadiene on abscission and ethylene production in citrus leaf explants. *Physiologia Plant.* 63, 114-120
- Song, J., Fan, L., Forney, CF., Jordan, MA., Hildebrand, PD., Kalt, W. & Ryan, DAJ.** 2003. Effect of ozone treatment and controlled atmosphere storage on quality and phytochemicals in highbush blueberries. *Acta Hort.* 600, 417-423.
- Song, Y., Kim H. K. & Yam, K. L.** 1992. Respiration rate of blueberry in modified atmosphere at various temperatures. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117, 925-929.
- TEAP.** 2010. Report of the Technology and Economic Assessment Panel, October, 2010. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Tebets, J.E. & Walse, S.S.** 2014. Postharvest treatment of blueberries with methyl bromide to control spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii*. Prepared as a final report for the California Blueberry Commission as part of USDA-ARS agreement # 58-5302-3-387. USDA-ARS-SJVASC, Parlier, CA 93648
- Thang, K., Au, K., Rakovski, C. & Prakash, A.** 2016. Effect of phytosanitary irradiation and methyl bromide fumigation on the physical, sensory, and microbiological quality of blueberries and sweet cherries. *J. Sci. Food Agric.* 96, 4382-4389.
- Yi, W., Fischer, J., Krewer, G. & Akoh, C.** 2005. Phenolic compounds from blueberries can inhibit colon cancer cell proliferation and induce apoptosis. *J. Agric. Food Chem.* 53, 7320-7329.
- Zheng, Y., Wang, C.I., Wang, S.Y. & Zheng, W.** 2003. Effect of high-oxygen atmospheres on blueberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity. *J. Agric. Food Chem.* 51, 7162-7169.