UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL

P R E S E N T A:

M.C. Gloria Arantxa Sotelo Alcántara

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Iran Alia Tejacal

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Víctor López Martínez

Cuernavaca, Morelos, noviembre de 2026

Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.).

Tesis realizada por M. C. **Gloria Arantxa Sotelo Alcántara,** bajo la dirección del comité revisor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el título de:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL

COMITÉ REVISOR

Director de tesis: _____

Dr. Iran Alia Tejacal

Codirector de tesis: _____

Dr. Víctor López Martínez

Revisor: _____

Dr. Porfirio Juárez López

Revisor: _____

Dra. Erika Román Montes de Oca

Revisor: _____

Dra. Gloria Alicia Pérez Arias

Revisor: _____

Dr. Nelson Avonce Vergara

Revisor: _____

Dr. Óscar Gabriel Villegas Torres

Revisor: _____

Dr. Juan Manuel Villarreal Fuentes

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis el Dr. Iran Alia Tejacal, por creer siempre en mí y brindarme su respaldo en todo momento, por su acertada dirección, paciencia y valiosos consejos fueron clave para no rendirme y concluir este trabajo de investigación.

Hugo Sotelo y Verónica Alcántara, a mis hermanos y sobrinos, quienes son lo más importante en mi vida, porque en ellos puedo encontrar ese apoyo incondicional de cumplir siempre mis metas.

A mis amigas y amigos del laboratorio:

Hannya por una amistad que me impulsa a construirme día a día y a avanzar sin miedo hacia cada una de mis metas.

Daniela, por su amistad y calidez, por esa energía tan relajada y, a la vez, tan fuerte e imponente que me transmite y me ayuda a seguir adelante.

Goretti por todo lo que hemos vivido y aprendido. Gracias por una amistad que atesoro, a pesar de la distancia y ser tan distintas, siempre estamos juntas.

A Emiliano, Alí, Liz, quienes me enseñaron que la nobleza, el respeto y la diciplina si se convierten en virtudes que no todos poseen. Al igual que a Miriam, Susana, Orlando, Mariella y Ale, por las risas, los consejos y el apoyo mutuo en cada experimento. Gracias por convertir el espacio de trabajo en un lugar agradable y por acompañarme incondicionalmente en los momentos de mayor reto y a esas nuevas amistades de las cuales me siento muy feliz de conocerlos Samuel, Héctor y Omar.

A la M.C. Alyn Mariana Palacios Sosa, por demostrarme que el verdadero conocimiento se comparte con paciencia, empatía y amabilidad. Gracias por ese apoyo incondicional y por ser una guía tan valiosa desde que pise el laboratorio por primera vez.

Al Dr. Rubén Rodríguez y a la Dra. Claudia Grijalva, por brindarme su apoyo durante mi estancia de investigación en la Universidad de Guanajuato (UG). Su hospitalidad, orientación y disposición fueron fundamentales para el desarrollo de esta etapa.

A mi comité revisor: Dr. Víctor López Martínez, Dr. Porfirio Juárez López, Dra. Gloria Alicia Pérez Arias, Dra. Erika Román Montes de Oca, Dr. Juan Manuel Villarreal Fuentes, Dr. Óscar Gabriel Villegas Torres y Dr. Nelson Avonce Vergara por su apoyo, colaboración y disposición en esta investigación.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado a través de la beca de posgrado (N°. de becario 1000727), el cual fue fundamental para la realización de mis estudios y del presente trabajo de investigación.

A Morita recordándome que "El futuro pertenece a aquellos que creen en la belleza de sus sueños" (Eleanor Roosevelt) MKMM.

A la familia Piña (Mariel, Javier y Elias) por su amistad y su apoyo en cada uno de mis proyectos.

DEDICATORIAS

«PEDES IN TERRA, AD SIDERA VISUS»

Proverbio latín

ÍNDICE GENERAL **Pág.**

ÍNDICE GENERAL…….. I

ÍNDICE DE FIGURAS……IX

RESUMEN ……..…. 1

ABSTRACT ..…….... 2

INTRODUCCIÓN GENERAL……... 3

OBJETIVO GENERAL……... 7

LITERATURA CITADA …….. 8

CAPÍTULO I EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE QUITOSANO AL 1% EN LA VIDA ÚTIL POSCOSECHA DE CUATRO VARIANTES DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.)…… 13

RESUMEN…… 13

ABSTRACT …….. 14

1.1. INTRODUCCIÓN …… 15

1.2 OBJETIVO …… 17

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS …… 17

1.3. HIPÓTESIS ……..…….. 17

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS …….. 17

1.4.1 Material vegetal, localización y organización experimental…….. 17

1.4.2 VARIABLES A EVALUADAS……... 19

1.4.2.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno……. 19

1.4.2.2. Pérdida de peso acumulada …… 19

1.4.2.3. Firmeza de pulpa ……..…… 20

1.4.2.4. Color de la epidermis del fruto …… 20

1.4.2.5. Sólidos solubles totales (SST) …….. 20

1.4.2.6. Acidez titulable (AT) …… 20

1.4.2.7. Índice de sabor (IS) ……21

1.4.2.8. Compuestos fenólicos …….. 21

1.4.2.9. Flavonoides totales ……..…….. 21

1.4.2.10 Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP ……... 22

1.4.2.11. Análisis de datos …… 23

1.5. RESULTADOS ……..…….. 23

1.5.1. ‘Costeña’ …… 23

1.5.1.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno ……... 23

1.5.1.2. Pérdida de peso acumulada …… 24

1.5.1.3. Firmeza de pulpa …….. 24

1.5.1.4. Color de epidermis del fruto …… 27

1.5.1.5. Sólidos solubles totales (SST) ……..…….. 29

1.5.1.6. Acidez titulable (AT) …… 29

1.5.1.7. Índice de sabor (IS) ……..…… 29

1.5.1.8. Compuestos fenólicos ……..…… 30

1.5.1.9. Flavonoides totales ……..…… 31

1.5.1.10. Actividad antioxidante: DPPH, ABTS y FRAP ……. 31

1.5.2. ‘Morada’…….. 33

1.5.2.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno ……...33

1.5.2.2. Pérdida de peso acumulada …… 36

1.5.2.3. Firmeza de pulpa ……..……..36

1.5.2.4. Color de epidermis del fruto …… 37

1.5.2.5 Sólidos solubles totales (SST) …….. 39

1.5.2.6. Acidez titulable (AT) …….. 39

1.5.2.7. Índice de sabor (IS) ……40

1.5.2.8. Compuestos fenólicos …….. 41

1.5.2.9. Flavonoides totales …… 41

1.5.2.10. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP …….. 42

1.5.3 ‘Roja’ …… 44

1.5.3.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno …….. 44

1.5.3.2. Pérdida de peso acumulada ……... 48

1.5.3.3. Firmeza de pulpa …….. 48

1.5.3.4. Color de epidermis del fruto …… 49

1.5.3.5. Sólidos solubles totales (SST) ……. 51

1.5.3.6. Acidez titulable (AT) …… 51

1.5.3.7. índice de sabor (IS) ……..… 52

1.5.3.8. Compuestos fenólicos …….. 53

1.5.3.9. Flavonoides totales …… 53

1.5.3.10. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP ……..… 54

1.5.4. ‘Amarilla’ …… 57

1.5.4.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno ……. 57

1.5.4.2. Pérdida de peso acumulada …… 60

1.5.4.3. Firmeza de pulpa …… 60

1.5.4.4. Color de epidermis del fruto …… 61

1.5.4.5. Sólidos solubles totales (SST) …… 64

1.5.4.6. Acidez titulable (AT) ……..64

1.5.4.7. Índice de sabor (IS) ……... 64

1.5.4.8. Compuestos fenólicos ……... 65

1.5.4.9. Flavonoides totales ..…….. 66

1.5.4.10 Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP ……66

1.6 DISCUSIÓN ……..… 69

1.7 CONCLUSIÓN …….. 74

1.8 LITERATURA CITADA ……..…… 74

CAPÍTULO II APLICACIÓN DEL ÁCIDO ACETILSALICÍLICO EN CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.) 'AMARILLA' …….. 80

RESUMEN ……. 80

ABSTRACT ……... 81

2.1 INTRODUCCIÓN ……... 82

2.2 OBJETIVO …….. 84

2.3 HIPÓTESIS…… 84

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS ……..…...… 84

2.4.1. Localización, material vegetal y organización experimental …….. 84

2.4.2 VARIABLES A EVALUADAS ……... 85

4.4.2.1 La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno ……. 85

2.4.2.2 Pérdida de peso acumulada ……..… 86

2.4.2.3 Firmeza de pulpa …… 86

2.4.2.3 Color de la epidermis del fruto …… 86

2.4.2.4. Sólidos solubles totales (SST) ..…… 87

2.4.2.5 Acidez titulable (AT) ……... 87

2.4.2.6 Índice de sabor (IS) …… 87

2.4.2.7 Compuestos fenólicos …… 87

2.4.2.8 Flavonoides totales ……... 88

2.4.2.9. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP…… 88

2.4.3 Análisis de datos ……89

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN …… 89

2.5.1 La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno …… 89

2.5.2 Pérdida de peso acumulada……..…….…… 93

2.5.3 Firmeza de pulpa……..93

2.5.4 Color de la epidermis del fruto …… 95

2.5.5 Sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de sabor (IS) …….… 97

2.5.6 Compuestos fenólicos, flavonoides totales y actividad antioxidante: DPPH, ABTS y FRAP ……99

2. 6 CONCLUSIÓN ……103

2.7. LITERATURA CITADA ……...103

CAPÍTULO III APLICACIÓN DE HEXANAL DURANTE LA MADURACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.) 'ROJA' …… 109

RESUMEN ……..……..109

ABSTRACT …… 110

3.1 INTRODUCCIÓN …… 111

3.2 OBJETIVO …… 113

3.3 HIPÓTESIS ……...113

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS ……... 113

3.4.1 Localización, material vegetal y organización experimental …….113

3.4.2 VARIABLES A EVALUADAS ……..……..……..……114

3.4.2.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno ……114

3.4.2.2. Pérdida de peso acumulada ……115

3.4.2.3. Firmeza de pulpa …….. 115

3.4.2.3. Color de la epidermis del fruto ……..115

3.4.2.4 Sólidos solubles totales (SST) …….. 116

3.4.2.5 Acidez titulable (AT) …….. 116

3.4.2.6. Índice de sabor (IS) ……..116

3.4.2.7. Compuestos fenólicos …….. 117

3.4.2.8. Flavonoides totales …….. 117

3.4.2.9. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP ……..... 118

3.4.3. Análisis de datos …….. 118

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN …….. 119

3.5.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno ……..119

3.5.2. Pérdida de peso acumulada ……..……122

3.5.3 Firmeza de pulpa……122

3.5.4 Color de la epidermis del fruto ……..……...123

3.5.5. Sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de sabor (IS) ……126

3.5.6. Compuestos fenólicos, flavonoides totales y actividad antioxidante: DPPH, ABTS y FRAP …….. 127

3.6 CONCLUSIÓN ……. 131
3.7 LITERATURA CITADA ……131

CONCLUSIÓN GENERAL ……..……..137

ÍNDICE DE FIGURAS Pág.

Figura 1. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E) y pérdida de peso (F) en frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo……...……27

Figura 2. Producción de etileno (A, B, C D, E) y firmeza (F) en frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo……..... 28

Figura 3. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo…… 30

Figura 4. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…… 32

Figura 5. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…… 34

Figura 6. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar…….. 36
Figura 7. Producción de etileno (A, B, C D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar…… 37

Figura 8. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…….. 39

Figura 9. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo …… 41

Figura 10. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo 43
Figura 12. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho

observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…….. 47
Figura 13. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar…….. 49
Figura 14. Producción de etileno (A, B, C D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar……50

Figura 15. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo ……..…….. 51

Figura 16. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…….. 54

Figura 17. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…….. 56

Figura 18. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo……. 60
Figura 19. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar…….. 62
Figura 20. Producción de etileno (A, B, C D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar……. 63

Figura 21. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo……. 65

Figura 22. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo……. 67

Figura 23. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…….. 69

Figura 24. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo……..72

Figura 25. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Amarillo' con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar…….... 95

Figura 26. Producción de etileno (A, B, C D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar……. 96

Figura 27. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…….. 98

Figura 28. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo…….. 101

Figura 29. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo ……..103
Figura 30. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo ……..100
Figura 31. Velocidad de respiración en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin aplicación de hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar……123
Figura 32. Producción de etileno en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin aplicación de hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar……. 124
Figura 33. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin aplicación de hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo……126
Figura 34. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin Hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo……128

Figura 35. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…..…….. 130
Figura 36. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo…… 134

RESUMEN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es un recurso fitogenético mesoamericano de alto valor nutricional y socioeconómico, producido tradicionalmente en sistemas de traspatio libres de agroquímicos. Sin embargo, al ser un fruto climatérico, presenta una alta perecibilidad con una vida de anaquel de apenas 1 a 3 días a temperatura ambiente debido al incremento en la velocidad de respiración, la producción de etileno y el rápido deterioro. Con el objetivo de prolongar su vida útil mediante tecnologías de bajo impacto ambiental, se evaluó el efecto de recubrimientos comestibles y retardadores de la maduración en combinación con bajas temperaturas. Para ello, frutos seleccionados en madurez fisiológica fueron sometidos a tratamientos poscosecha mediante inmersión en soluciones de quitosano, hexanal y ácido acetilsalicílico (ASA), además de un testigo sin tratar, almacenándose posteriormente bajo refrigeración a 7 y 12 °C, así como a temperatura ambiente. Durante el almacenamiento se determinaron variables físicas (pérdida de peso, firmeza de la pulpa y color de la epidermis), bioquímicas (compuestos fenólicos totales, flavonoides y actividad antioxidante) y fisiológicas (velocidad de respiración y producción de etileno). Los resultados demostraron que la combinación de refrigeración a 7 y 12 °C con los tratamientos aplicados crean una estrategia efectiva para retrasar el máximo climatérico y el deterioro fisiológico del fruto. Específicamente, el quitosano redujo la pérdida de peso mediante la formación de una barrera semipermeable, el ASA mostró un efecto antisenescencia en refrigeración y el hexanal actuó como regulador metabólico favoreciendo el desarrollo de color sin alterar el sabor, conservando en conjunto la firmeza y los compuestos bioactivos de la ciruela mexicana.

Palabras clave: *Spondias purpurea* L., climatérico, climatérico, hexanal, ácido acetilsalicílico.

ABSTRACT

The Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) is a Mesoamerican phytogenetic resource of high nutritional and socioeconomic value, traditionally grown in agrochemical-free backyard systems. However, as a climacteric fruit, it exhibits high perishability with a shelf life of only 1 to 3 days at ambient temperature due to an increase in respiration rate, ethylene production, and rapid deterioration. To extend its shelf life using low-environmental-impact technologies, the effect of edible coatings and ripening retardants combined with low temperatures was evaluated. Fruits harvested at physiological maturity were subjected to postharvest immersion treatments with chitosan, hexanal, and acetylsalicylic acid (ASA), alongside an untreated control, and subsequently stored under refrigeration at 7 and 12 °C, as well as at ambient temperature. During storage, physical (weight loss, flesh firmness, and skin color), biochemical (total phenolic compounds, flavonoids, and antioxidant activity), and physiological (respiration rate and ethylene production) variables were assessed. The results demonstrated that combining refrigeration at 7 and 12 °C with the applied treatments creates an effective strategy to delay the climacteric peak and physiological deterioration of the fruit. Specifically, chitosan reduced weight loss by forming a semipermeable barrier, ASA exhibited an anti-senescence effect under refrigeration, and hexanal acted as a metabolic regulator promoting color development without altering flavor, collectively preserving the firmness and bioactive compounds of the Mexican plum.

Key words: *Spondias purpurea* L., climacteric, hexanal, acetylsalicylic acid.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.), tiene como centro de origen Mesoamérica, pertenece a la familia Anacardiaceae, con un gran valor económico, social y cultural en el país, el cual representa un recurso fitogenético fundamental para la seguridad alimentaria en diversas regiones de México (Alia et al.,2020., Álvarez et al., 2024., Jiménez et al., 2023). Este cultivo se reporta desde la época prehispánica con una identidad cultural alimentaria del centro y sur de México y es considerado esencial en los huertos de traspatio y cercas vivas (Ruenes et al., 2016).

La importancia alimentaria de la ciruela mexicana está relacionada con su extraordinaria rusticidad y adaptación a suelos poco fértiles y pedregosos, típicos de la selva baja caducifolia, esta característica lo convierte en una estrategia durante el trópico seco y húmedo; mientras que la mayoría de los cultivos tienen problemas en su ciclo por algún tipo de estrés en su mayoría el hídrico, al poco manejo agronómico y sus sistemas de producción tradicional libre de agroquímicos, este bajo costo de mantenimiento transforma a los árboles de traspatio en un banco de alimentos de libre acceso con un beneficio a la economía familiar garantizando el autoconsumo, brindando no solo un aporte directo en la economía, también en un aspecto nutricional y ecológico, esencial para el desarrollo de las zonas rurales del país (Avitia et al., 2003., Álvarez et al., 2024., García et al., 2022).

Investigaciones bioquímicas señalan que la ciruela mexicana posee un alto porcentaje de pulpa aprovechable y una elevada concentración de sólidos solubles totales (hasta 21 °Brix), lo que se traduce en un aporte energético inmediato de carbohidratos, azúcares, compuestos antioxidantes como flavonoides y vitamina C (Villarreal et al., 2019., Ferreira, et al., 2025). Este fruto presenta una limitante por su corta vida poscosecha y alta perecibilidad, factor determínate del rápido deterioro fisiológico, al ser clasificado como un fruto climatérico y esto significa que tras ser separado del árbol, el fruto experimenta un aumento en su tasa respiratoria y una producción elevada de etileno, la pérdida de firmeza y cambios sensoriales como el sabor, el color del epicarpio bajo condiciones de temperatura ambiente y su vida útil

es apenas entre 1 a 3 días y menor a las dos semanas bajo condiciones estrictamente controladas (Romero et al., 2021., Álvarez et al., 2024).

Este fenómeno metabólico acelera la senescencia, debido a que los carbohidratos, lípidos y ácidos orgánicos almacenados en los tejidos se degradan rápidamente (Álvarez et al., 2017., Kader, 2002). Ante esta situación, la implementación de tecnologías poscosecha se presenta como una estrategia que combina métodos de conservación eficaces y seguros, como el almacenamiento en refrigeración, el uso de recubrimientos biodegradables y el envasado en atmósferas modificadas, que han demostrado reducir la producción de dióxido de carbono (Co_2) y etileno para prolongar la vida útil del fruto, optimizando el manejo poscosecha conservando los atributos fisicoquímicos del fruto y, al mismo tiempo disminuir pérdidas económicas que actualmente afectan a los productores rurales del país (Romero et al., 2021., Álvarez et al., 2022., Pérez et al., 2024., Kader 2002).

De manera complementaria, el desarrollo e innovación en recubrimientos biodegradables y comestibles representa un enfoque técnico prometedor para la conservación poscosecha de *Spondias purpurea*. La aplicación de estos biopolímeros, como las soluciones de quitosano, actúa como una barrera semipermeable al intercambio gaseoso, lo que reduce significativamente la tasa de respiración y estabiliza los niveles de compuestos fenólicos y flavonoides, por lo tanto la integración de esta tecnología con el almacenamiento en refrigeración contribuye a mitigar el deterioro del fruto y mejora los canales de distribución regionales. Los recubrimientos de quitosano en ciruela mexicana a concentraciones de 1 y 2% indican que mantienen firmeza por periodos prolongados, en parámetros de calidad como los sólidos solubles totales (°Brix) y en acidez titulable, se ha demostrado que este recubrimiento ejerce una doble función benéfica: además de retardar los picos fisiológicos de madurez, conserva una mayor concentración de compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante en el epicarpio, presenta una potente actividad fungicida natural que disminuye drásticamente la incidencia de infecciones patógenas poscosecha. Por lo cual, el uso del quitosano representa una de las alternativas tecnológicas más viables y ecológicas para extender la vida útil de la

ciruela mexicana, aumentando la rentabilidad para los productores regionales (García et al., 2023., Gutiérrez et al., 2018).

Otros estudios mencionan al hexanal como un aldehído natural de seis carbonos, un potente agente biológico para extender el almacenamiento comercial, el mecanismo de acción prioritario de este compuesto volátil radica en su capacidad para inhibir de forma competitiva a la enzima fosfolipasa D (PLD), la cual cataliza la desestabilización de las membranas celulares y promueve la pérdida de fluidez lipídica durante el envejecimiento celular y al retrasar esta cascada enzimática, el tratamiento con hexanal reduce drásticamente las tasas de respiración y bloquea la señalización prematura del etileno, esto permite que la pared celular del fruto mantengan su integridad mecánica por más tiempo (Paliyath y Subramanian, 2008.,Yuan et al., 2025).

Una de las aplicaciones de hexanal en frutos mediante inmersión; se ha consolidado como uno de los métodos poscosecha más eficientes y homogéneos en la poscosecha. a diferencia de las aspersiones en campo, las cuales dependen estrictamente de las condiciones climáticas, la inmersión asegura un contacto uniforme con toda la superficie del fruto y facilita una absorción celular controlada (Kondo et al., 2019). Investigaciones demuestran que sumergir los productos en formulaciones basadas en este aldehído disminuye los picos respiratorios, además de retrasar significativamente la degradación de la clorofila y la pérdida de peso (Sholberg y Gaunce, 1995).

El impacto de la inmersión se refleja de manera comercial en cultivos tropicales y templados, como en mango, plátano y fresa, mencionando que una inmersión poscosecha logra prolongar la vida comercial entre 6 y 9 días adicionales en comparación con frutos testigo, incrementando la retención de compuestos bioactivos y la acidez titulable, reduciendo hasta en un 22% las pérdidas económicas por pudrición, posicionando a la inmersión en hexanal como una herramienta importante en la agricultura (Silué et al., 2022., Yumbya et al., 2019).

La técnica de la inmersión se maneja como una alternativa de bajo impacto ambiental y alta adopción para los productores y al aplicarla en frutos con soluciones de ácido acetilsalicílico (ASA), se convierte en un tratamiento poscosecha que ha demostrado buenos resultados en la conservación tanto de especies climatéricas como no climatéricas, en frutos climatéricos como el tomate (*Solanum lycopersicum*) y el kiwi (*Actinidia deliciosa*), la inmersión logra retrasar el pico de respiración, reducir la deshidratación y suprimir la expresión de genes asociados con el ablandamiento de los tejidos (Villamizar & Quintero, 2017.,Wang et al., 2022). Por otro lado, en frutos no climatéricos como la cereza (*Prunus avium*), granada (*Punica granatum*) y en la fresa (*Fragaria ananassa*), la aplicación de soluciones de ASA disminuye el acelerado cambio de color, reduce los síntomas de daño por frío en almacenamiento prolongado y actúa como un inductor que activa los sistemas de defensa antioxidante y fúngica del fruto frente a patógenos (Samaniego & Torres, 2018., Sayyari et al., 2011., Valero et al., 2011).

La importancia de sumergir frutos en soluciones de ácido acetilsalicílico (ASA) se estableció para inducir una absorción celular rápida y eficiente a través de la epidermis y al ingresar a los tejidos, el ASA se hidroliza de manera inmediata, modulando de forma sistémica la síntesis de etileno y el ablandamiento de la epidermis. Además, la inmersión no solo actúa como un vehículo para el regulador de crecimiento, sino que también funciona como un tratamiento de lavado superficial que reduce la carga microbiana inicial, lo que ayuda a la resistencia del fruto ante patógenos durante el almacenamiento (Valero et al., 2011., Wang et al., 2022). Por lo tanto, el uso de inmersiones con ácido acetilsalicílico representa una innovación accesible que no interrumpe la poscosecha y ofrece una respuesta efectiva para prolongar la vida de anaquel en mercados de exportación de alta exigencia (Magaña-Benítes et al., 2021., Sayyari et al., 2011).

La combinación del uso de estas técnicas y la temperatura muestra beneficios ante pérdidas poscosecha al prolongar la vida de anaquel; el control térmico mediante la refrigeración se ha reconocido como la herramienta tecnológica más accesible y eficaz, debido a que disminuye de forma directa la velocidad de las reacciones

enzimáticas, des este modo, se logra desacelerar la degradación de la clorofila, la hidrólisis de almidones y la pérdida de firmeza, por lo tanto determinar la temperatura óptima de almacenamiento es importante, al ser un fruto tropical es altamente susceptible a manifestar daños por frío si se expone a temperaturas inferiores a su umbral de tolerancia, lo que provoca pardeamiento de la corteza y alteraciones en el sabor (Osuna et al., 2021., Pérez et al., 2008). A pesar de los avances en la caracterización de las diversas variantes de *Spondias purpurea* L., aún existe una necesidad latente de optimizar las tecnologías de refrigeración combinadas con tratamientos complementarios para mantener la calidad organoléptica y funcional intacta por periodos prolongados (Montalvo et al., 2019., Filgueiras et al., 2025).

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los cambios físicos, químicos y fisiológicos en frutos de ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea* L.) con un recubrimiento comestible a base de quitosano y retardadores de maduración de hexanal y ácido acetilsalicílico para incrementar la vida de anaquel en refrigeración.

LITERATURA CITADA

Alia-Tejacal, I., Maldonado-Astudillo, Y. I., Núñez-Colín, C. A., Jiménez-Hernández, J., Rivera-Cabrera, F., & Bautista-Baños, S. (2020). Abscisión de frutos en ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Cuernavaqueña'. Revista Fitotecnia Mexicana, 43(1), 103-112. https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.103-112.

Álvarez-Vargas, J.E., Alia-Tejacal, I., Chávez-Franco, S.H., Colinas-León, M.T., Nieto-Ángel, D., Rivera-Cabrera, F., Aguilar-Pérez, L. A. (2017). Ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea* L.) de clima húmedo y seco: Calidad, metabolitos funcionales y actividad antioxidante. *Interciencia* 42: 653-660.

Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Maldonado-Astudillo, Y. I., Núñez-Colín, C. A., & Pelayo-Zaldívar, C. (2022). Pérdidas poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) y alternativas de manejo tecnológico en áreas rurales de México. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha*, *23*(2), 145-158.

Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Maldonado-Astudillo, Y. I., Núñez-Colín, C. A., & Pelayo-Zaldívar, C. (2024). Estudio etnobotánico de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en la región Centro de Guerrero, México. *Botanical Sciences*, 102(4), 1184-1198. https://doi.org/ 10.17129/botsci.3501

Avitia, G.E., Castillo, G.A.M., Pimienta, E. (2003). *Ciruela mexicana y otras especies del género* Spondias. Estado de México, México: Universidad Autónoma Chapingo, 968-884-912. ISBN (968-884-912-X).

Ferreira- da Silva, Á. G., Costa, F. B. da, Nascimento, A. M. do, Sales, G. N. B., Silva, J. L. da, Silva Neta, A. M. de S., Ribeiro, W. S., Silva, T. I. da, & Feitosa, B. F. (2025). *Spondias purpurea* L. (Anacardiaceae) fruits flours at different maturation stages: Drying kinetics, mathematical modelling, characterization and correlation analysis. *Heliyon*, *11*(2),e41832. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41832.

Filgueiras, H. A. C., Alves, R. E., & Mosca, J. L. (2001). Criterios de calidad y fisiología postcosecha de frutos del género *Spondias*. *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture*, 45, 89-93.

García-Flores, A., Valle-Marquina, R., Ruenes-Morales, M. de R., & Román-Montes de Oca, E. (2022). Ciruela mexicana: de Mesoamérica para el mundo. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, *18*(44), 1-13. https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.44/1.

García-Cruz, S. J., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G. A., Guillén-Sánchez, D., & Pelayo-Zaldívar, C. (2023). Conservación poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) mediante la combinación de quitosano y refrigeración. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *46*(2), 165-174.https://doi.org/10.35196/rfm.2023.2.165.

Gutiérrez-Martínez, P., Ledezma-Morales, J. A., Bautista-Rosales, P. U., Alia-Tejacal, I., & Serrano-Carreón, L. (2018). Efecto del recubrimiento con quitosano y la temperatura en la calidad postcosecha y niveles de infección en la ciruela mexicana. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *19*(1), 114-121.

Jiménez Camberos, C., Rodríguez Bautista, G., López Roa, R. I., & Anguiano Sevilla, L. A. (2023). La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.): Un tesoro nutricional y sostenible en la agricultura regional. *Revista de Investigación Traslacional*, 1(1), 1-12.

Kader, A. A. (Ed.). (2002). *Postharvest technology of horticultural crops* (3rd ed.). University of California, *Agriculture and Natural Resources*, 3311.

Kondo, S., Kittikorn, M., & Kanlayanarat, S. (2019). Postharvest hexanal dipping treatment suppresses respiration rate, ethylene production, and maintains cell membrane integrity in tropical fruits. *Postharvest Biology and Technology*, *155*, 34–42. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.05.008.

Magaña-Benítes, W., Balbín-Arias, M. I., Corrales-García, J., Rodríguez-Hernández, A., Saucedo-Veloz, C., Cañízares-Chacón, E., & Sauri-Duch, E. (2021). Alternativas tecnológicas postcosecha y uso de inductores de resistencia para la extensión de la vida de anaquel en frutos tropicales y de traspatio en *México. Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha, 22(1), 89-102.*

Montalvo-González, E., García-Magaña, M. D., & Mata-Montes de Oca, M. (2019). Efecto del almacenamiento en atmósfera modificada sobre la vida útil de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 20(2), 140-152.

Osuna-García, J. A., Pérez-Barraza, M. H., & Avitia-García, E. (2021). Temperaturas de refrigeración y tolerancia al daño por frío en frutos de jocote o ciruela mexicana. *Scientia Agropecuaria*, 12(3), 345-352. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.038.

Paliyath, G., & Subramanian, J. (2008). Phospholipase D inhibition technology for enhancing shelf life and quality of fruits and vegetables. In G. Paliyath, D. P. Murr, A. K. Handa, & S. Lurie (Eds.), *Postharvest biology and technology of fruits, vegetables, and flowers* (pp. 211-238). https://doi.org/10.1002/9780813804088.ch10.

Pérez-Arias, G. A., Alia-Tejacal, I., Valdez-Aguilar, L. A., & Colinas-León, M. T. (2008). Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la maduración de la ciruela mexicana. *Postharvest Biology and Technology*, 48(2), 220-227. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.10.006.

Pérez-Arias, G. A., Alia-Tejacal, I., Valdez-Aguilar, L. A., & Guillén-Sánchez, D. (2024). Efecto de recubrimientos biodegradables a base de quitosano y atmósferas modificadas en la conservación de la calidad y vida de anaquel de la ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). *Scientia Agropecuaria*, *15*(1), 45-56. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.004.

Romero-Hinojosa, B. M., Arzate-Bolaños, J. J., Alia-Tejacal, I., Álvarez-Vargas, J. E., Pérez-Arias, G. A., Galindo-García, D. V., & Guillén-Sánchez, D. (2021). Postcosecha de cuatro ecotipos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) cultivados en Morelos, México. *Current Topics in Agronomic Science*, *1*(1), 21–29. https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2021.08.02a.

Ruenes-Morales, M. R., M. M. Ferrer-Ortega, P. I. Montañez-Escalante y N. M.Fortuny-Fernández. (2016). La conservación de los abales (*Spondias purpurea* L.) ciruela mexicana) y sus parientes silvestres en la península de Yucatán. *Agroproductividad*,9(4) pp: 55-62.

Samaniego-Gámez, B. Y., Garruña, R., Jaramillo-López, P. F., Juárez-Maldonado, A., Lara-Capistrán, L., & Lagunes-Fortiz, E. (2016). Efecto del ácido salicílico sobre el sistema de defensa antioxidante y calidad poscosecha en frutos de fresa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *7*(7), 1629-1640. https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.162.

Sayyari, M., Castillo, S., Valero, D., Díaz-Mula, H. M., & Serrano, M. (2011). Acetyl salicylic acid alleviates chilling injury and maintains nutritive and bioactive compounds and antioxidant activity during postharvest storage of pomegranates. *Postharvest Biology and Technology*, *60*(2), 136-142. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.07.004.

Silué, Y., Nindjin, C., Cissé, M., Kouamé, K. A., & Amani, N. G. (2022). Hexanal application reduces postharvest losses of mango (*Mangifera indica* L. variety 'Kent') over cold storage whilst maintaining fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, *189*. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111928.

Sholberg, P. L., & Gaunce, A. P. (1995). Fumigation of fruit with acetic acid or hexanal to prevent postharvest decay. *HortScience*, *30*(6), 1271-1275. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.6.1271.

Valero, D., Díaz-Mula, H. M., Zapata, P. J., Castillo, S., Guillén, F., Martínez-Romero, D., & Serrano, M. (2011). Postharvest treatments with salicylic acid, acetylsalicylic acid or oxalic acid delayed ripening and enhanced bioactive compounds and antioxidant capacity in sweet cherry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59*(10), 5483–5489. https://doi.org/10.1021/jf200873j.

Villarreal, F. J.M., T. I. Alia, P. X. D. Pérez, Z. S. Espinosa, Marroquín, A. F.J., Núñez, C. C.A. (2019). Caracterización fisicoquímica de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en el Soconusco, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, Villahermosa, 6*, 219-29. https://doi.org/10.19136/era.a6n17.2023.

Villamizar, J. E., & Quintero, G. I. (2017). Aplicación de tratamientos poscosecha basados en inductores de resistencia para el mantenimiento de la calidad en tomate *(Solanum lycopersicum)*. Editorial Académica Universitaria.

Wang, J., Gao, H., Yin, X., Allan, A. C., & Wang, W. (2022). Transcriptome analysis reveals mechanisms of acetylsalicylic acid-mediated fruit quality maintenance in fresh-cut kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, *194*, 112100. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112100.

Yuan, X., Zhang, L., Wang, J., Liu, Y., Zhao, H., & Zhou, Q. (2025). Structural insights into phospholipase D inhibition by hexanal vapors to maintain membrane lipids and mechanical integrity in horticultural crops during senescence. *Postharvest Biology and Technology*, *219*,113241. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113241.

Yumbya, P., Hutchinson, M. J., Ambuko, J., & Owino, W. O. (2019). Effect of hexanal as a post-harvest treatment to extend the shelf-life and maintain quality of 'sweet banana' fruits. *International Journal of Plant & Soil Science*, *29*(4), 1-12. https://doi.org/10.9734/ijpss/2019/v29i430154.

CAPÍTULO I

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE QUITOSANO AL 1 % EN LA VIDA ÚTIL POSCOSECHA DE CUATRO VARIANTES DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.)

RESUMEN

La ciruela mexicana es un fruto apreciado en todo México por su sabor agridulce, se encuentra cultivada tanto en huertas establecidas, como familiares para autoconsumo es comercializada en pequeña escala en mercados municipales y regionales. La vida de almacenamiento de frutos de ciruela mexicana de estación seca es corta (entre 4 y 6 d), considerando que es un fruto altamente perecedero por lo que la búsqueda de recubrimientos comestibles que en combinación con la refrigeración logra aumentar su vida útil. El objetivo fue evaluar el efecto del quitosano al 1% en cambios físicos, químicos, fisiológicos a temperatura ambiente (25 °C) y refrigeración (7 y 12 °C) en variantes 'Costeña', 'Morada', 'Roja' y 'Amarilla' cosechados en madurez fisiológica media y fueron almacenados a 7, 12 y 25 °C con aplicación de quitosano (CQ) o sin aplicación de quitosano (SQ). Los resultados muestran que la aplicación de quitosano retrasó la respiración y producción de etileno a temperatura ambiente (25 °C), reduciendo la intensidad de producción de etileno en 'Morada' y en 'Roja'. La aplicación del quitosano retrasó la maduración a temperatura ambiente y en refrigeración retraso la firmeza y menor velocidad de cambio de color. En almacenamiento a 12 °C con quitosano extendió la calidad comercial entre 18 y 20 d en (SST), compuestos fenólicos, flavonoides y las actividades antioxidantes (DPPH, ABTS y FRAP). El almacenamiento a baja temperatura de 7 °C retrasó la maduración hasta 24 d, pero se presentaron síntomas de daño por frío a partir del 18 d en 'Costeña', 'Morada' y 'Amarilla', siendo la variante 'Roja' la única tolerante. Los resultados sugieren que el uso de quitosano al 1% combinado con una refrigeración de 12 °C es la estrategia es recomendada para la ciruela mexicana, ya que retrasa la maduración y mantiene las propiedades nutraceúticas sin daños por frío.

Palabras clave: Quitosano, daño por frio, madurez, perecedero, recubrimiento

ABSTRACT

The Mexican plum is a fruit appreciated throughout Mexico for its sweet and sour flavor. It is cultivated both in established orchards and family gardens for self-consumption, and it is marketed on a small scale in municipal and regional markets. The shelf life of dry-season Mexican plum fruits is short (between 4 and 6 d) considering it is a highly perishable fruit; therefore, the search for edible coatings combined with refrigeration has successfully extended its shelf life. The objective of this study was to evaluate the effect of 1% chitosan on the physical, chemical, physiological, and nutraceutical attributes at room temperature (25 °C) and under refrigeration (7 and 12 °C) in the 'Costeña', 'Morada', 'Roja', and 'Amarilla' variants harvested at medium physiological maturity. The fruits were stored at 7, 12, and 25 °C with or without (SQ) chitosan application. The results demonstrate that chitosan treatment significantly suppressed respiration rates and ethylene evolution under ambient conditions (25 °C), reducing peak ethylene production intensity in both 'Morada' and 'Roja' variants. Furthermore, the chitosan coating delayed senescence at room temperature, while under refrigeration, it effectively maintained tissue firmness and decelerated color transition rates. Storage at 12 °C combined with chitosan application preserved commercial quality for 18 to 20 d, maintaining optimal levels of total soluble solids, phenolic compounds, and flavonoids, as well as robust antioxidant activities (DPPH, ABTS, and FRAP assays). Conversely, although low-temperature storage at 7 °C delayed ripening for up to 24 d, cold damage symptoms manifested by day 18 in 'Costeña', 'Morada', and 'Amarilla', leaving 'Roja' as the sole tolerant variant. These findings indicate that the application of 1% chitosan coupled with refrigeration at 12 °C represents the optimal postharvest strategy for Mexican plum, as it effectively retards senescence and sustains nutraceutical properties while completely avoiding cold damage.

Key words: Chitosan, cold damage, maturity, perishable, coating.

1.1. INTRODUCCIÓN

La ciruela mexicana es un fruto apreciado en todo México por su sabor agridulce, se consume en fresco o como extractos para preparar bebidas refrescantes, dulces y otros platillos (Ruenes et al., 2022). Su origen es el occidente de México (Jalisco, Nayarit, Michoacán) y se reportan 8,401 ha establecidas en el país, los principales estados productores son Chiapas (28.1%), Jalisco (13.9%), Puebla (12.8%), Guerrero (8.5 %) y Veracruz (8.2 %) (Fortuny et al., 2017., SIAP, 2026). Los frutos de ciruela muestran gran potencial como materia prima para la industria refresquera, confitería y en la elaboración de frutos deshidratados, además la facilidad de su cultivo en huertos caseros es importante para la promoción de alimentos saludables, ya que el consumo en fresco o en diferentes preparaciones proporciona alto contenido de fibra, potasio, hierro, zinc, vitamina C, carotenoides, compuestos fenólicos y antocianinas (Ferrer et al., 2022).

De acuerdo con varios autores, en México se conocen dos tipos de ciruela, las de estación húmeda y las de estación seca, en las primeras los frutos se cosechan entre finales de marzo a junio y en las segundas se cosechan entre septiembre a octubre (Cancino et al., 2023). La ciruela mexicana se encuentra cultivada tanto en huertas establecidas, como familiares para autoconsumo es comercializada en pequeña escala en mercados municipales y regionales (Ruenes et al., 2022); por ejemplo, en los municipios del Estado de Morelos, como Cuernavaca, Jojutla, Cuautla y Tepoztlán, la venta de este fruto es en recipientes con capacidad de aproximadamente 10 kg, cubetas (20.5 kg), carretillas o puestos improvisados con el fruto para la venta en unidades de medida de 300 g (Monroy et al., 2020).

La vida de almacenamiento de frutos de ciruela mexicana de estación seca es corta (entre 4 y 6 d), considerando la madurez con la que se cosechan los frutos, es decir, ya sea en madurez fisiológica, en madurez de consumo o en la transición de ambas etapas, aspecto importante que define la calidad final del producto (Alia et al., 2022., Cancino et al., 2024., Maldonado et al., 2023). Una vez cosechada se almacena a temperatura ambiente, ya que aún no se han determinado las temperaturas recomendadas para esta fruta; pero se sabe que son susceptibles a daño por frío

durante el almacenamiento a bajas temperaturas. En ciruelas de estación húmeda se ha indicado que el color y los sólidos solubles totales (SST) fueron afectados negativamente después de refrigerarse por 10 d a 5 °C (García et al., 2016).

Por otro lado, el desarrollo de recubrimientos comestibles biodegradables y películas se utiliza para ayudar a conservar nutrientes importantes, minimizando o eliminando por completo los efectos negativos asociados con el procesamiento de alimentos (Chizaryfard y Karakaya., 2022). El quitosano consiste de unidades repetidas de D–glucosamina y N–acetil–D–glucosamina, unidas por puentes glucosídicos y es obtenido de la desacetilación de la quitina, componente abundante en los organismos de origen marino como crustáceos (cangrejos, camarones, langostas etc.), es un biopolímero catiónico, gracias a características como su grupo amino, (-NH_2) del quitosano se protonan formando grupos amino catiónicos (-$NH_{3\ +}$), lo que aumenta la repulsión eléctrica intermolecular y da como resultado un polímero soluble policatiónico, que ha sido ampliamente utilizado en diferentes áreas, ya que es biocompatible con muchos sistemas biológicos (López et al., 2019., Kumar et al., 2020).

En ciruela de estación húmeda Bautista et al. (2006) mencionan que la temperatura a 12 °C en combinación con concentraciones de quitosano de 2 y 2.5 % fue la más efectiva para evitar una pérdida excesiva de biomasa, además de disminuir la incidencia de enfermedades; la evidencia también mostró alteraciones en el proceso de maduración, por lo que estudios adicionales que incluyan experimentos con temperaturas entre 12 y 15 °C podrían abrir la posibilidad de aplicar una temperatura controlada; sin embargo, en ciruelas de estación seca, aún no se ha evaluado el uso del quitosano y la refrigeración.

1.2. OBJETIVO

Evaluar los cambios físicos, químicos y fisiológicos de algunas variantes de ciruela mexicana de estación seca, aplicando un recubrimiento de quitosano al 1 % y almacenadas a 7 y 12 °C para incrementar su vida útil.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar los cambios físicos, químicos y fisiológicos de ciruelas mexicanas de las variantes ‘Costeña’, ‘Morada’, ‘Roja’ y ‘Amarilla’ con quitosano al 1 % en dos temperaturas de almacenamiento (7 y 12 °C) para incrementar su vida de anaquel.

1.3. HIPÓTESIS

Los frutos con recubrimientos de quitosano al 1 % a 7 °C retrasarán y conservarán la presencia de los procesos fisiológicos, físicos, químicos y nutracéuticos por más de 15 d, sin causar efectos negativos en la calidad de la fruta.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Material vegetal, localización y organización experimental

En abril de 2022 se colectaron frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) ‘Costeña’, provenientes de Villa Guerrero, municipio de Juan R. Escudero, estado de Guerrero, México (17° 09′ 58″ N, 99° 31′ 46″ O, 252 msnm) (INEGI, 2020) y frutos de la variante ‘Morada’ proveniente de Tepalcingo, estado de Morelos, México (18°35′42″N 98°50′42″O / 18.595 msnm) (INEGI, 2020). En mayo de 2023 se colectaron las variantes ‘Roja’ y ‘Amarilla’. Los frutos se cosecharon manualmente en maduración ½ verde (50 % del color de la epidermis rojo y 50 % verde) y posteriormente fueron transportados en cajas de plástico vía terrestre, entre 1 a 4 h al Laboratorio de Producción Agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en

la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Los frutos fueron seleccionados sin magulladuras, daño por insectos o patógenos, se lavaron con una solución clorada al 1 %, posteriormente se secaron a temperatura ambiente y se acondicionaron a temperatura ambiente durante 2 h para los tratamientos a evaluar.

Con la variante 'Costeña' se formaron grupos de frutos a los cuales se aplicaron los siguientes tratamientos: 1) Frutos sin aplicar quitosano a 7 ºC (SQ 7 ºC), 2) Sin quitosano a 12 ºC (SQ 12 ºC), 3) Con quitosano a 7 ºC (CQ 7 ºC), 4) Con quitosano a 12 ºC (CQ 12 ºC). Adicionalmente se tuvo un grupo de ciruelas donde no se aplicó quitosano y se utilizó como tratamiento testigo, almacenados a temperatura ambiente (25 ± 2 °C, HR 60 %). Los frutos en refrigeración se mantuvieron en oscuridad en cámaras de temperatura controlada (OLG, Mod.800-D, CHN) 60 % HR. La unidad experimental fue un fruto, con ocho repeticiones bajo un diseño experimental completamente al azar.

En las variantes 'Morada', 'Roja' y 'Amarilla' se formaron los mismos grupos de frutos con los siguientes tratamientos: 1) Frutos sin aplicar quitosano a 7 ºC (SQ 7 ºC), 2) Sin quitosano a 12 ºC (SQ 12 ºC), 3) Con quitosano a 7 ºC (CQ 7 ºC), 4) Con quitosano a 12 ºC (CQ 12 ºC), 5) Con quitosano a 25 °C (CQ 25 °C) y 6) Sin Quitosano a 25 °C. Los frutos mantenidos a temperatura ambiente (25 ± 2 °C, HR 60 %) fueron evaluados diariamente y cada 6 días. Los frutos almacenados a 7 y 12 °C se mantuvieron en oscuridad en cámaras de temperatura controlada (OLG, Mod.800-D, CHN) 60 % HR. La unidad experimental fue un fruto, con ocho repeticiones bajo un diseño experimental completamente al azar.

La solución de quitosano se preparó como lo indican Sotelo et al., (2022), la cual se generó al disolver 1 g de quitosano (160-200 kDa (80 % DD); BIOTECH-QUIM®, MEX) en 100 mL vinagre comestible (5 % de ácido acético; Clemente Jacques®, México) agitando durante 1 h a temperatura ambiente. La aplicación de la cubierta de quitosano fue con una brocha de uso alimentario de pelo fino por todo el fruto y

se dejó secar a temperatura ambiente durante 1 h. Posteriormente se llevaron en charolas de plástico para almacenarlos en las diferentes temperaturas.

1.4.2 VARIABLES A EVALUADAS

1.4.2.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

Se cuantificaron mediante un sistema estático (Thewes et al., 2021) que consistió en colocar dos frutos de masa conocida en recipientes de capacidad de 250 mL, cerrados herméticamente durante 2 h. Posteriormente, se tomó 1 mL de gas del espacio de cabeza a través de la septa de los frascos, para inyectarlo a un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 7890A System GC EUA.), con una columna tipo abierta con empaque de capa porosa de sílica conectada simultáneamente a un detector de ionización de flama (FID) a una temperatura de 170 °C y otro de conductividad térmica (TCD) a 170 °C, como gas acarreador se utilizó N_2 (2 mL/min). El inyector y horno del cromatógrafo mantuvieron una temperatura de 150 y 80 °C respectivamente, durante las mediciones. Para la cuantificación se utilizaron estándares de CO_2 (460 ppm) y etileno (100 ppm) (Quark INFRA® MX).

1.4.2.2. Pérdida de peso acumulada

Los frutos de ciruela se pesaron en una balanza digital (OHAUS®, EUA). El peso inicial se comparó con el registrado en cada fecha de evaluación que se realizó durante los 20 días de evaluación y se calculó el porcentaje acumulado de pérdida de peso del fruto con la fórmula siguiente (Maldonado et al., 2023):

$$Pérdida\ de\ peso\ (\%) = \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ final}\ x100$$

1.4.2.3. Firmeza de pulpa

Se midió con dos lecturas en la parte ecuatorial del fruto cada 6 d y se utilizó un texturometro (Chatillon®, Mod. MT150L, EUA) con un puntal cónico de 6.5 mm de diámetro y 11 mm de altura, los resultados se expresaron en Newton (N).

1.4.2.4. Color de la epidermis del fruto

El color de la epidermis del fruto se midió con un espectrofotómetro de esfera (X-rite®, Mod. SP64, EUA). El color se determinó marcando tres áreas de forma circular distribuidas por todo el fruto después de aplicar el tratamiento, posteriormente se realizaron las lecturas con el espectrofotómetro en la misma posición. Se registraron los valores de luminosidad (L*), cromaticidad (C*) y matiz (h) (Kasajima, 2019). El color de la epidermis del fruto se determinó diariamente durante el periodo de evaluación.

1.4.2.5. Sólidos solubles totales (SST)

Se determinaron con refractómetro digital (ATAGO-PAL 1®, Japón) cada 6 d, las muestras se determinaron a partir de una gota de jugo de la pulpa de cada fruto, los resultados se reportaron como °Brix (Maldonado et al., 2023).

1.4.2.6. Acidez titulable (AT)

Se obtuvo por medio de la técnica descrita por Ladaniya (2023), a partir de 1 g de pulpa de cada fruto se homogenizó en 10 mL de agua destilada con un Ultraturrax (IKA®, EUA). Posteriormente, el homogenizado se centrifugó y se tomaron 5 mL del sobrenadante para titularse con hidróxido de sodio (NaOH, 0.1 N). Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico, utilizando la formula a continuación descrita:

$$Acidez\ titulable\ (\%) = \frac{A\ x\ B\ x\ C\ x\ D\ x\ 100}{W\ x\ Y\ x\ 1000}$$

Donde, A= Volumen de NaOH utilizado para la titulación, B= Normalidad del NaOH (0.1 N), C= Volumen total del homogenizado (muestra + 10 mL de agua), D= Peso equivalente del ácido cítrico (64), W= Volumen del sobrenadante utilizado para la titulación y Y= Peso de la muestra.

1.4.2.7. Índice de sabor (IS)

Con los valores de sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT) se determinó el índice de sabor, al dividir los SST entre la AT (Maldonado et al., 2023).

1.4.2.8. Compuestos fenólicos

El contenido de compuestos fenólicos se determinó con el reactivo de Folin & Ciocalteu, para lo cual se homogenizo 1 g de pulpa fresca con 10 mL de agua destilada con un Ultra Turrax (IKA®, EUA), el homogenizado se centrifugo a 2200 g por 5 min y del sobrenadante se tomaron 0.5 mL que se colocaron en un tubo de ensaye de 20 mL y se mezclaron con 2.5 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (1:10 v/v) y después de 1 min y antes de 7 min se adicionó 2 mL de carbonato de sodio a 7.5 % (p/v) y se dejó reposar durante 2 h. Posteriormente se tomaron las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico (EAG) $100g^{-1}$ de peso fresco, para lo cual se construyó una curva de calibración con ácido gálico de 10 a 100 mg L^{-1} (Singleton et al., 1999).

1.4.2.9. Flavonoides totales

Los flavonoides totales se determinaron con la metodología de Arvouet et al. (1994). Se homogeneizó 1 g de pulpa con 10 mL de metanol en un Ultra Turrax (IKA®, EUA), posteriormente se centrifugaron a 2200 g durante 5 min en una centrifuga de mesa (Ortoalresa®, España), y del sobrenadante se tomaron 2 mL que se hicieron reaccionar con 2 mL de una solución de tricloruro de aluminio al 2 % p/v y se dejaron en oscuridad por 15 min, para posteriormente tomar las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud

de onda de 415 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de quercetina (EQ) $100g^{-1}$ para lo cual se construyó una curva de quercetina de 3 a 30 mg L^{-1}.

1.4.2.10 Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP

Se utilizó la metodología propuesta por Brand et al. (1995), con mínimas modificaciones, para este método se utilizó el sobrenadante que se obtuvo de la extracción de los compuestos fenólicos, con 0.1 mL y 2.9 mL de una solución de DPPH metanólica $6.1x10^{-5}$ M (Sigma Aldrich, EUA), se dejó la reacción por 30 min en oscuridad y se tomaron las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 517 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1}, se construyó una curva de calibración con ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

Se preparó ABTS (Sigma-Aldrich, EUA) 7 mM y persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) a 2.45 mM y se mezclaron 1:1 v/v y se dejaron en agitación por 16 horas, a partir de esta solución se diluyó con etanol 20 % hasta obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.02 a 734 nm, entonces 3 mL de la solución ABTS se hizo reaccionar con 50 μL del extracto acuoso de cada muestra y después de 15 min se determinó las lecturas, los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1} peso fresco (Re *et al.* 1999), se construyó una curva de ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}. Se empleó la metodología desarrollada por Benzie y Strain (1996), para esto se preparó el reactivo FRAP (TPTZ, $FeCl_3$ y amortiguador de acetato), donde 1.8 ml del reactivo se mezclaron con 140 mL de agua destilada y 60 mL de la solución de las muestras e incubadas a 37 °C por 30 min. Posteriormente, la absorbancia a 593 nm fue determinada. Los resultados se expresaron en mg equivalente de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1} peso fresco con una curva de calibración de ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

1.4.2.11. Análisis de datos

Los resultados fueron analizados mediante ANOVA y cuando se detectaron diferencias significativas se realizó comparación de medias por la prueba estadística de Tukey ($P \leq 0.05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SigmaPlot® V.15 (Systat Software Inc., EUA).

1.5. RESULTADOS

1.5.1. 'Costeña'

1.5.1.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

El máximo climaterio en los frutos testigo se detectó al octavo día (Figura 1 E) y las ciruelas mantuvieron su apariencia comercial por 10 d. Los frutos almacenados a 7 °C CQ ó SQ mostraron su máximo de respiración a los 11 y 12 d, respectivamente (Figuras 1 A-C); en tanto que los frutos almacenados a 12 °C CQ ó SQ mostraron el climaterio a los 13 y 8 d (Figuras 1 B-D). Los frutos almacenados a 7 °C CQ ó SQ retrasaron su madurez comercial hasta 24 d, pero con algunos síntomas de daños por frío a partir de los 18 d, con mayor evidencia en los frutos SQ (datos no mostrados), mientras que la madurez comercial de los frutos almacenados a 12 °C CQ ó SQ su madurez comercial ocurrió entre 18 y 12 d, respectivamente (Figuras 1 A-D), sin presentar daños por frío. Estos resultados sugieren que la temperatura a 7 °C y la aplicación de quitosano a 12 °C retrasó la velocidad de respiración comparado con los frutos testigo.

La producción máxima de etileno en los frutos testigo fue a los 8 d (Figura 2 E). En los frutos almacenados a 7 °C CQ ó SQ el máximo climaterio se detectó a los 19 y 18 d (Figura 2 A-C). Por otra parte, los frutos almacenados a 12 °C CQ ó SQ el máximo climaterio se observó entre el día 18 y 11 (Figura 2 B-D). Los resultados sugieren que la temperatura de almacenamiento y aplicación de quitosano retrasaron el máximo climaterio, el cual se asocia a la maduración de los frutos, además que el

almacenamiento a bajas temperaturas (7 y 12 °C) disminuyó la intensidad de producción de etileno (Figura 2 A E).

1.5.1.2. Pérdida de peso acumulada

La pérdida de peso en los frutos testigo fue mayor a 16 % después de 9 d de evaluación (Figura 1 F). Los frutos almacenados a 7 y 12 °C, CQ o SQ mostraron pérdida de peso entre 8 y 11 % después de 19 d (Figura 1 F). Los frutos CQ mostraron significativamente menor pérdida que los frutos SQ en las dos temperaturas evaluadas (Figura 1 F).

1.5.1.3. Firmeza de pulpa

La firmeza inicial (18.7 N) en los frutos testigo disminuyó 45 % después de 4 d (10.2 N), ya en el 6 d se redujo hasta 52 % (9 N) y al final de las evaluaciones la pérdida de firmeza fue de 60 % (7.6 N) en el décimo día (Figura 2 F). Los frutos SQ y CQ a 12 °C mostraron una firmeza entre 16.3 y 18.8 N al d 12; posteriormente, los frutos CQ a 12 °C se mantuvieron en 13.2 N al d 18 (Figura 2 F). Los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ al d 24 de evaluación mostraron valores entre 14.5 y 14.7 N (Figura 2 F). Los resultados anteriores sugieren que la temperatura de refrigeración de 7 °C ayudo a mantener la firmeza en los frutos independientemente de la aplicación de la cubierta de quitosano (Figura 2 F).

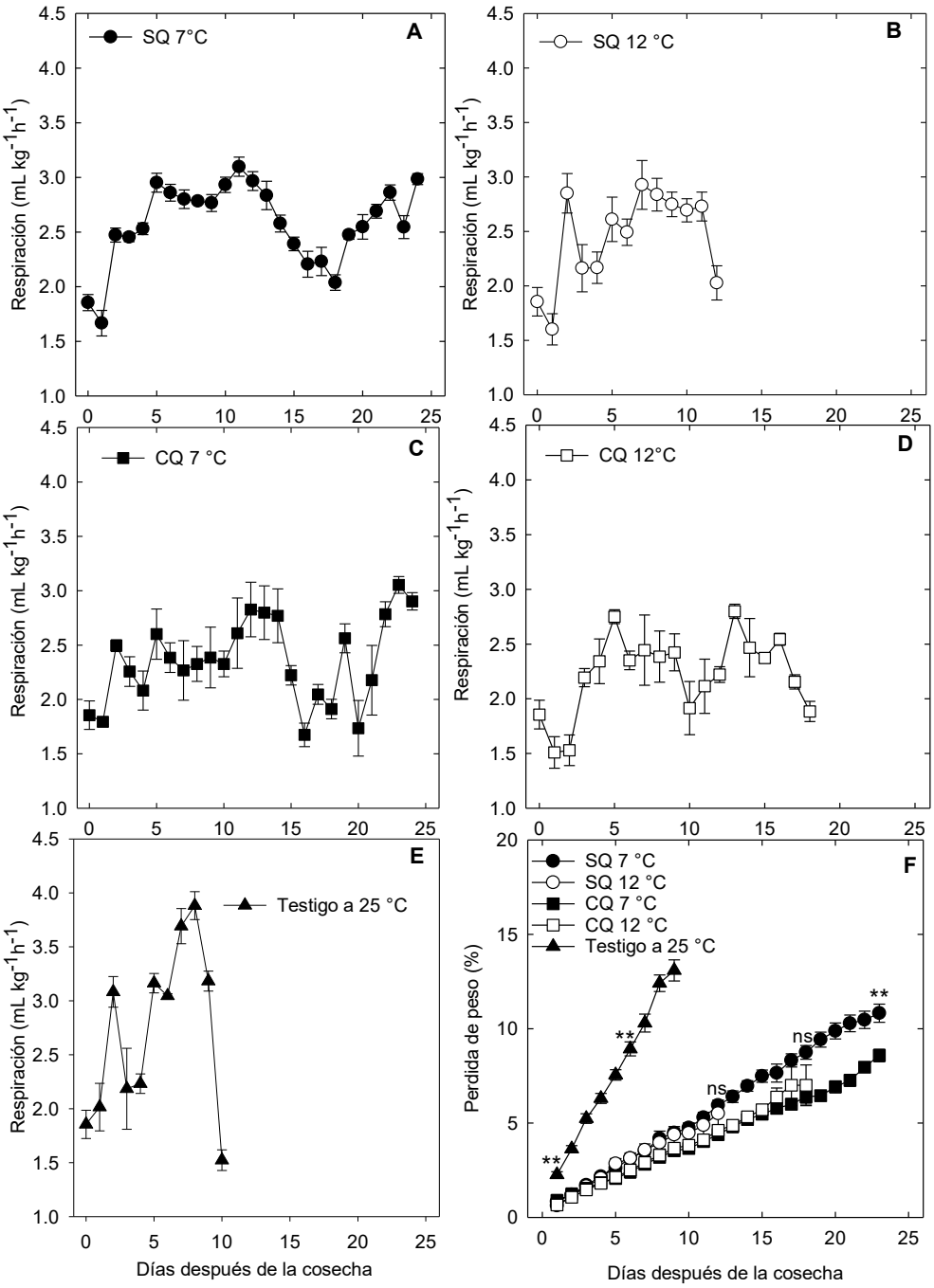

Figura 1. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E) y pérdida de peso (F) en frutos de ciruela mexicana ‘Costeña’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

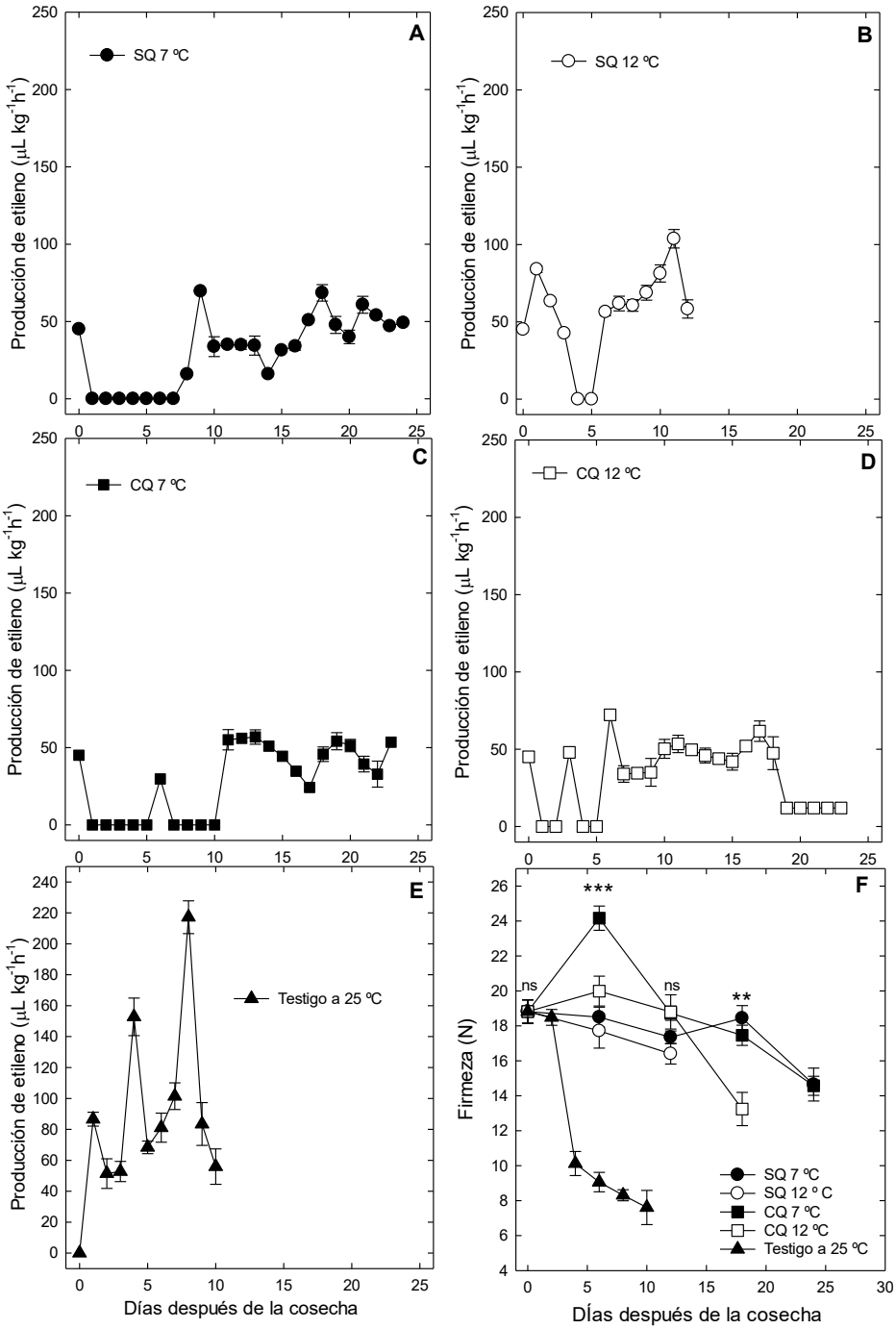

Figura 2. Producción de etileno (A, B, C D, E) y firmeza (F) en frutos de ciruela mexicana ‘Costeña’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.1.4. Color de epidermis del fruto

El color en frutos testigo cambió de verde-amarillo opaco con luminosidad media (L*= 47.6, C*= 25.2, h°= 71.0) al inicio de las evaluaciones, a un rojo vivido de luminosidad baja (L*=35.5, C*= 40.5, h°= 35.1) después de 6 d., posteriormente, no se observaron cambios significativos en el color rojo (h°= 31.1-34.0), pero los frutos fueron más opacos (C*= 30.8) y menos luminosos (L*= 28.9; Figura 3). Los frutos almacenados a 12 °C SQ y CQ alcanzaron el color rojo tendiente al púrpura vívido a los 12 y 14 d, respectivamente (Figura 3 C), la luminosidad y cromaticidad alcanzaron valores similares a los frutos referencia después de 11-15 d (Figura 3). Por otra parte, los frutos almacenados a 7 °C SQ ó CQ desarrollaron un color tendiente al naranja vívido a los 24 d (h°= 50-60), la luminosidad disminuyó (L* = 37.7) y la cromaticidad alcanzó el máximo al día 23 (C*= 41.4, Figura 3). Los resultados sugieren que la temperatura de 7 °C y el recubrimiento de quitosano retrasó la síntesis de los pigmentos que otorgan el color a frutos de ciruela mexicana ‘Costeña’.

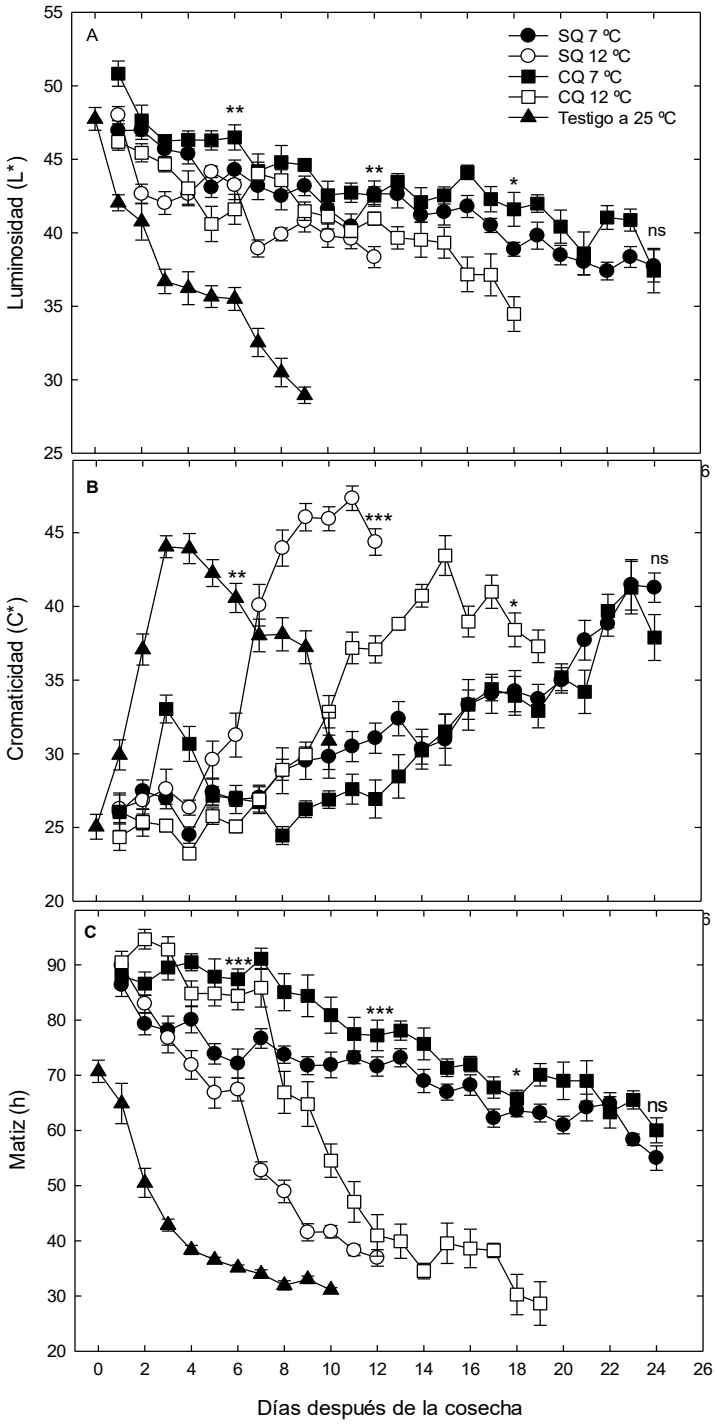

Figura 3. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.1.5. Sólidos solubles totales (SST)

Los SST en los frutos testigo mostraron 9.1 °Brix en la cosecha y alcanzaron su máximo contenido a los 4 d (13.6 °Brix) manteniéndose entre 12.8-13.3 °Brix los días posteriores (Figura 4 A). La refrigeración retrasó el aumento de SST, en los frutos almacenados a 7 °C CQ o sin SQ, la máxima acumulación fue a los 24 d con 11.1-11.7 °Brix, mientras que en los frutos almacenados a 12 °C la máxima acumulación fue antes, a los 12 d en los frutos SQ con 11.9 °Brix y los frutos CQ el máximo se alcanzó a los 18 d con 12.8 °Brix (Figura 4 A), esto último sugiere que a 12 °C el quitosano retrasó la acumulación de SST.

1.5.1.6. Acidez titulable (AT)

La AT en los frutos testigo disminuyó durante la maduración de 1.1 % a 0.94 % en 6 d y posteriormente alcanzó 0.86 % a los 10 d (Figura 4 B). En los frutos almacenados a 12 °C CQ o SQ, la AT disminuyó hasta 0.81-0.87 % al d 4 de evaluación, posteriormente entre los 12 y 18 d de almacenamiento la AT se mantuvo entre 1.1 y 1.2 % durante los 12 y 18 d de evaluación (Figura 4 B). En los frutos almacenados a 7 °C SQ la AT se mantuvo entre 0.8 y 1.2 % entre los 6 y 24 d de evaluación, mientras que los frutos almacenados a 7 °C CQ los valores estuvieron entre 0.6 y 0.8 % en el mismo periodo. Esto sugiere que la baja temperatura y la aplicación de quitosano incrementó la AT (Figura 4 B).

1.5.1.7. Índice de sabor (IS)

El índice de sabor (IS) se incrementó durante la maduración de los frutos testigo de 8.4 a 15.8 % en 10 d (Figura 4 C). Los frutos almacenados a 7 o 12 °C CQ o SQ mostraron valores de 12.2 y 13.5 % de IS a los 6 d de almacenamiento, posteriormente a los 12 d, el IS disminuyó hasta 9.3 y 10.2 % en todos los tratamientos a excepción de los frutos almacenados a 12 °C CQ donde el IS se incrementó ligeramente a 13.9 %, en estos frutos se mantuvieron entre 14.4 y 15.9

% a los 18 y 24 d de almacenamiento, mientras que el resto de los tratamientos se mantuvo entre 7.8 y 11.4 % (Figura 4 C). Los resultados sugieren que el IS fue menor al disminuir la temperatura de almacenamiento y que el quitosano contribuyó a la disminución del IS.

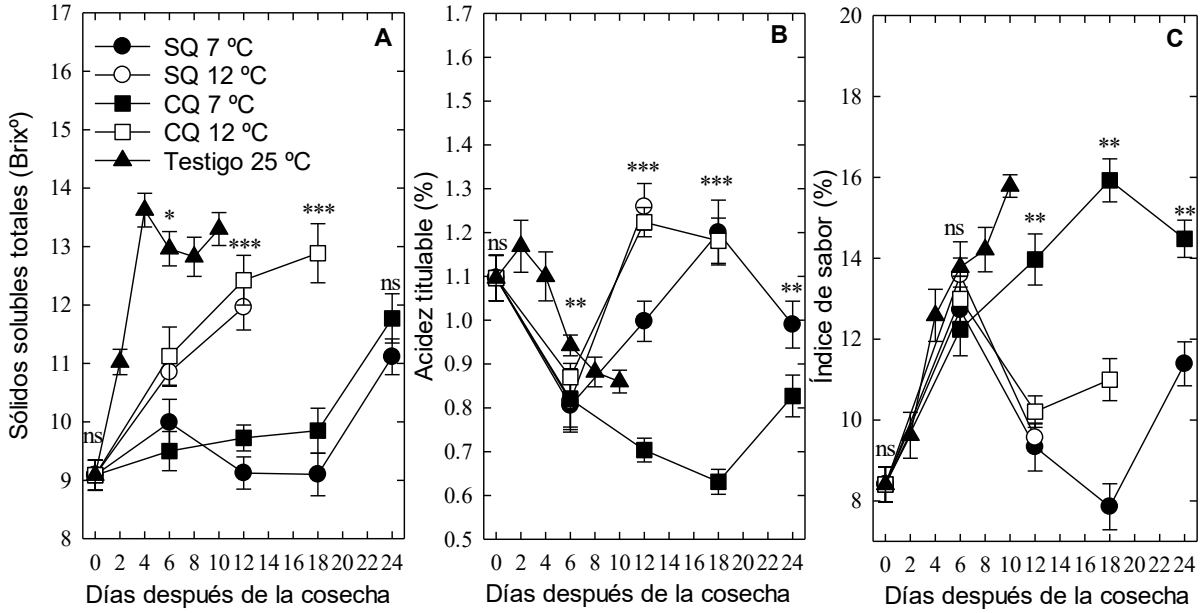

Figura 4. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.1.8. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos (CF) disminuyeron durante la maduración de los frutos testigo, con valores iniciales de 1010 mg EAG $100g^{-1}$ a 184 mg EAG $100g^{-1}$ después de 8 d (Figura 5 A). En los frutos almacenados a 7 o 12 °C CQ o SQ los CF a los 6 d disminuyeron entre 254.4 y 549.0 mg EAG 100 g^{-1}, para posteriormente incrementarse en el d 12 hasta 825.6 y 843.6 mg EAG 100 g^{-1} y finalmente entre los 18 y 24 d disminuyeron a valores entre 203.1 y 221.0 mg EAG 100 g^{-1} (Figura 5 A). No se detectaron diferencias significativas consistentes entre tratamientos, sin

embargo, se observa un retraso del comportamiento de la síntesis y degradación de estas moléculas (Figura 5 A).

1.5.1.9. Flavonoides totales

Los flavonoides totales en los frutos testigo mostraron una reducción de 67.5 mg EQ $100g^{-1}$ inicialmente a 38.8 mg EQ $100g^{-1}$ después de 6 d y posteriormente se incrementó a 59.2 mg EQ $100g^{-1}$ a los 10 d (Figura 5 B). En los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ disminuyó el contenido de flavonoides hasta 48.8 y 55.2 mg EQ $100g^{-1}$ después de 12 y 18 d, respectivamente en dichas condiciones (Figura 5 B), en tanto que en los frutos almacenados a 7 °C CQ o SQ el contenido de flavonoides se mantuvo entre 56 y 65 mg EQ $100g^{-1}$ durante todo el periodo de evaluación (Figura 5 B). Lo anterior indica que la refrigeración a 7 °C retrasó la degradación de los flavonoides y el quitosano no mostró un efecto en esta variable (Figura 5 C).

1.5.1.10. Actividad antioxidante: DPPH, ABTS y FRAP

La actividad antioxidante evaluada por los métodos de DPPH, ABTS y FRAP en los frutos testigo mostró un comportamiento transitorio, es decir, la actividad antioxidante se incrementó alcanzando un máximo y posteriormente disminuyó (Figura 5 C–E). Los frutos refrigerados a 7 o 12 °C CQ o SQ mostraron el comportamiento transitorio por un periodo más amplio, donde la máxima actividad antioxidante se cuantificó entre los 6 y 18 d de evaluación, y posteriormente disminuyó al d 24; se detectaron diferencias significativas consistentes entre los frutos almacenados a las dos temperaturas bajas evaluadas, donde la aplicación de quitosano mostró significativamente mayor actividad antioxidante evaluada por DPPH y FRAP (Figura 5 C-E).

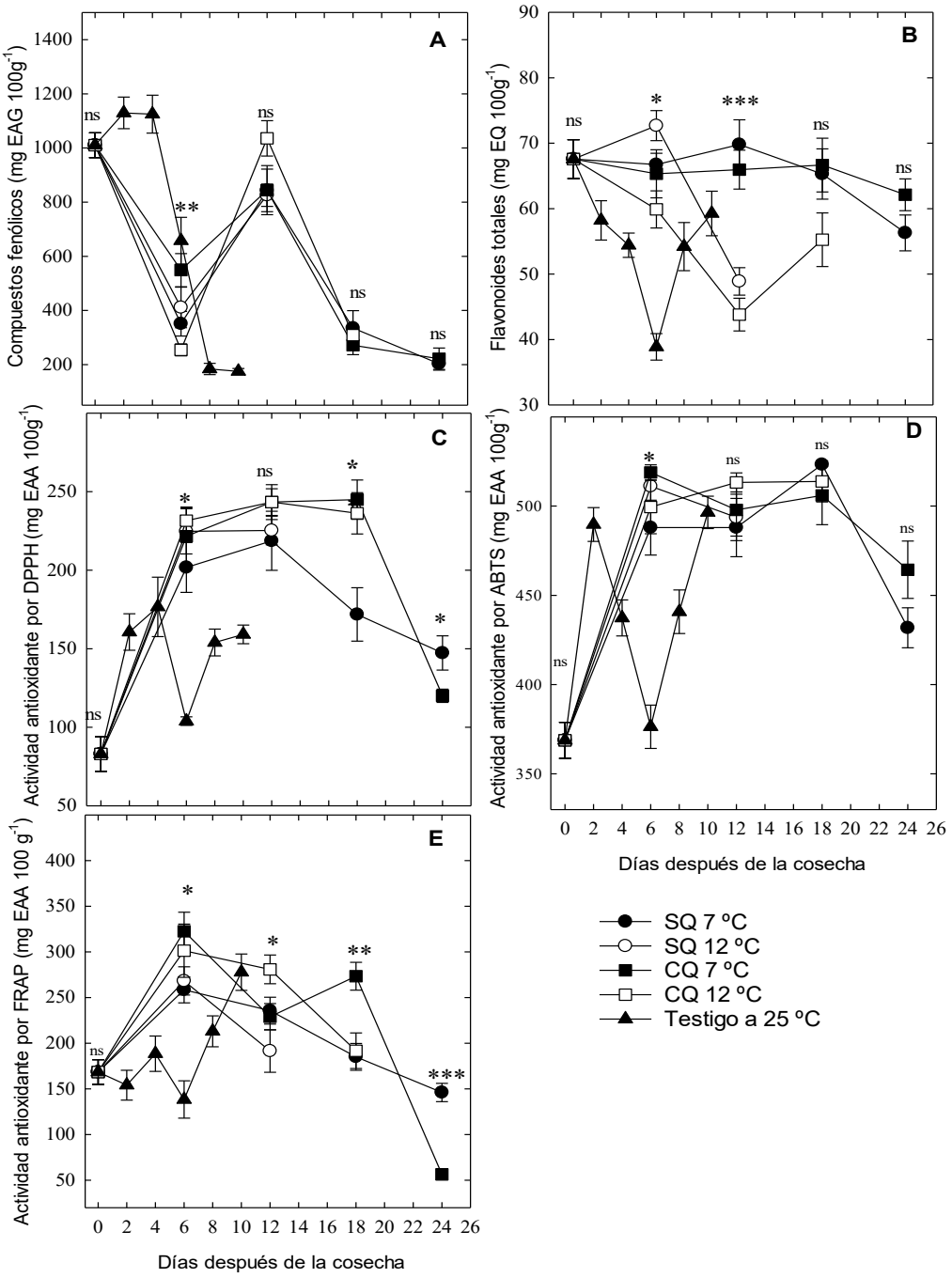

Figura 5. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Costeña' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.2. ‘Morada’

1.5.2.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

La mayor velocidad de respiración en los frutos CQ o SQ a 25 °C fue a los 7-8 d (Figura 7 E-F). En los frutos SQ almacenados 7 °C se observó en el 13 d, mientras que a 12 °C el máximo fue a los 11 d (Figura 7A-B). En cuanto a los tratamientos con recubrimientos de quitosano se observaron valores máximos a los 16 d (Figura 7C-D) mostrando baja efectividad del recubrimiento de quitosano para retrasar el máximo climatérico.

La producción de etileno mostró un incremento significativo después de la cosecha en todos los tratamientos evaluados, los frutos CQ y SQ a temperatura ambiente alcanzaron su máxima producción a los 9 y 8 d, respectivamente (Figura 8E-F). Los frutos CQ mostraron una reducción del máximo climatérico de 81.6 % con respecto de los frutos SQ a temperatura ambiente, atribuido al efecto de la cubierta de quitosano como barrera para el libre movimiento de los gases entre el fruto y el exterior (Figura 8E-F). En los frutos almacenados a baja temperatura se determinó que aquellos CQ a 7 °C el máximo climatérico fue alrededor de 280 μL μL kg^{-1} h^{-1} y se presentó el día 13, en tanto que aquellos frutos SQ a 7 y 12 °C y CQ a 7 °C el máximo climatérico estuvo en aproximadamente 380 μL kg^{-1} h^{-1} y se presentó a los 12, 15 y 14 d, respectivamente (Figuras 7A, B,C y D). Estos resultados sugieren un efecto de la temperatura y la cubierta de quitosano en la producción de etileno.

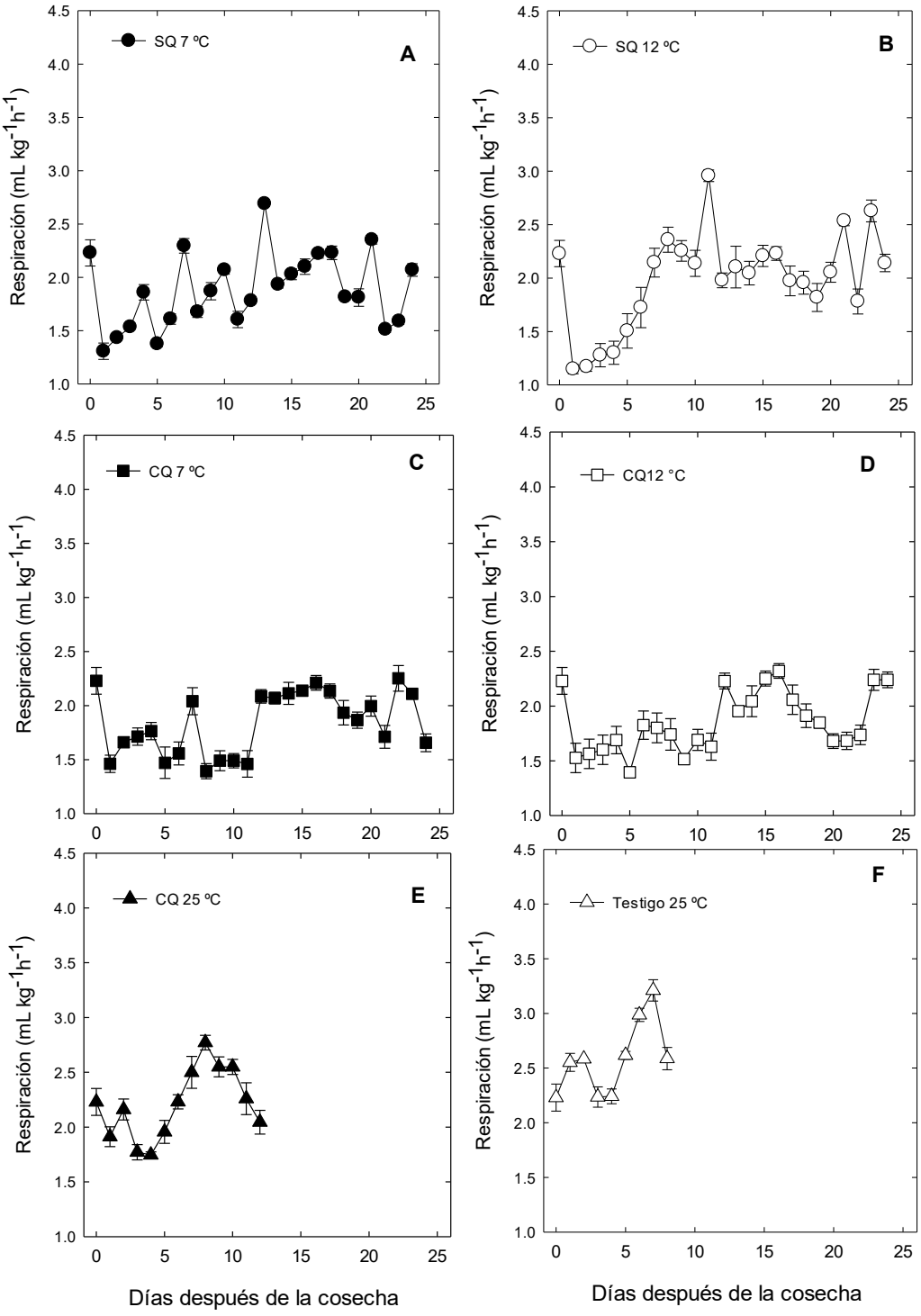

Figura 6. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

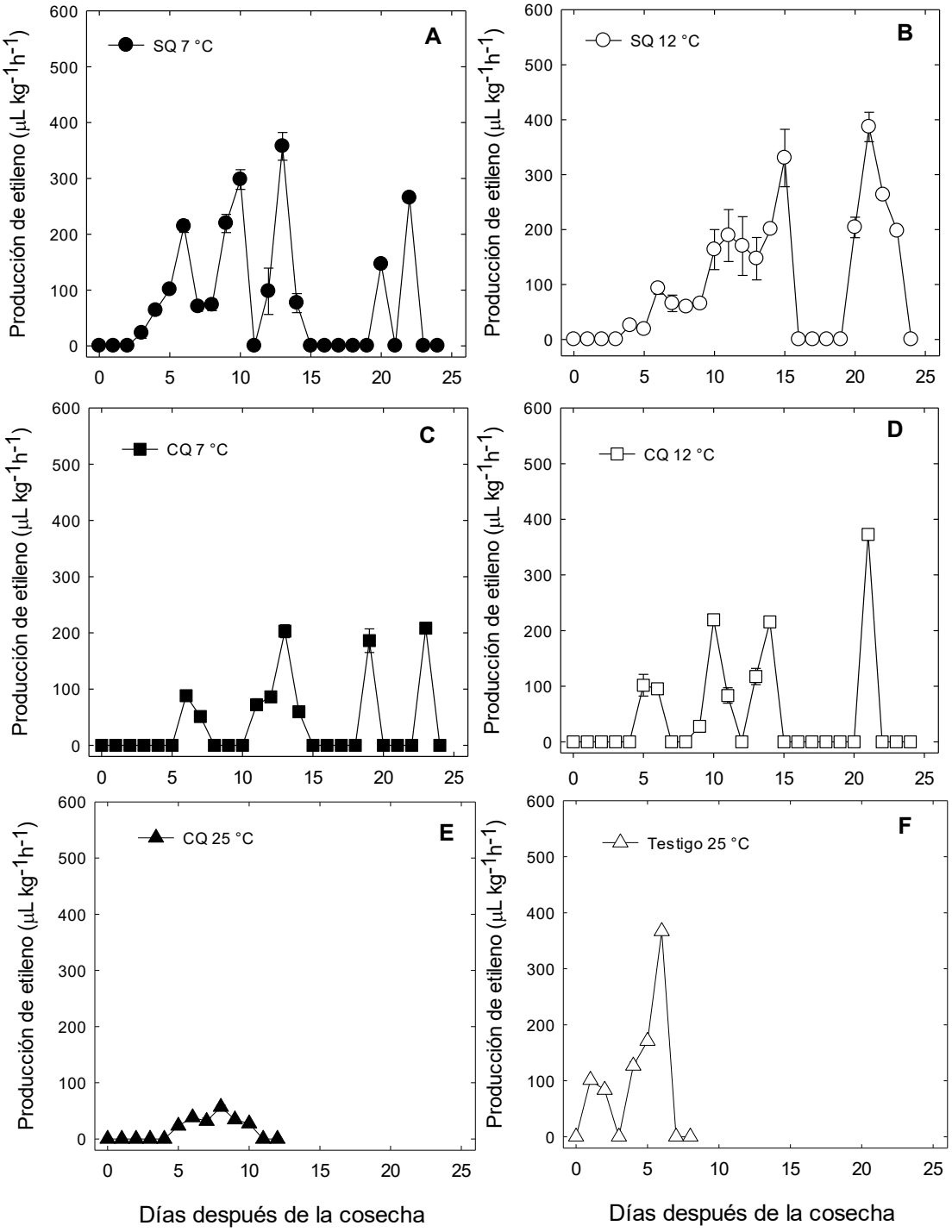

Figura 7. Producción de etileno (A, B, C D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

1.5.2.2. Pérdida de peso acumulada

En el sexto día de evaluación se determinó que los frutos SQ a 25 °C y CQ a 25 °C y 12 °C mostraron una pérdida de peso de 18.8, 9.06 y 8.92 %, mientras que los frutos almacenados a 7 °C CQ o SQ y 12 °C SQ mostraron una menor pérdida de peso entre 5.42 y 7.78 %, lo que sugiere que la menor temperatura de almacenamiento favoreció la menor pérdida de peso (Figura 9 A). En el día 12 de evaluación, los frutos SQ a 25 °C ya no tenían valor comercial; sin embargo, los frutos CQ a 25 °C aun eran comercializables, pero con una pérdida de peso de 26.2 %, superando significativamente en 10.8 y 12.2 % a los frutos CQ o SQ almacenados a 7 o 12 °C y los frutos almacenados a SQ a 12 °C; solo mostraron similitud estadística con los frutos almacenados 12 °C CQ (Figura 9 A). En el muestreo de los 18 d de almacenamiento no se observaron diferencias significativas entre los frutos que fueron almacenados a 12 o 7 °C CQ o SQ (Figura 9 A). Finalmente, a los 24 d de almacenamiento se detectó que los frutos a 7 °C CQ mostraron entre 6.0 y 9.96 % menos pérdida de peso que los frutos almacenados a 7 °C SQ o 12 °C CQ o SQ (Figura 9 A). Los resultados sugieren que el almacenamiento a 7 °C CQ favorece una menor pérdida de peso.

1.5.2.3. Firmeza de pulpa

La firmeza inicial de los frutos fue de 41.62 N, después de 6 d la firmeza disminuyó significativamente, entre 19.9 y 25.6 N en los frutos CQ o SQ a 25 °C y almacenados a 12 °C SQ, mientras que los frutos almacenados a 7 °C CQ o SQ y a 12 °C CQ la firmeza se mantuvo entre 28 y 36.6 N (Figura 9 B). A los 12 d, los frutos a 25 °C CQ y almacenados a 12 °C SQ tuvieron significativamente la menor firmeza (16.8–20.7 N) mientras que los frutos almacenados a 7 o 12 °C CQ o SQ mantuvieron su firmeza entre 24.6 y 34 N (Figura 9 B). Finalmente, a los 18 y 24 d, los frutos SQ almacenados a 7 ó 12 °C tuvieron significativamente menor firmeza comparado con los frutos almacenados a las mismas temperaturas, pero cubiertos CQ (Figura 9 B). Los resultados sugieren que el quitosano favoreció el mantenimiento de la firmeza.

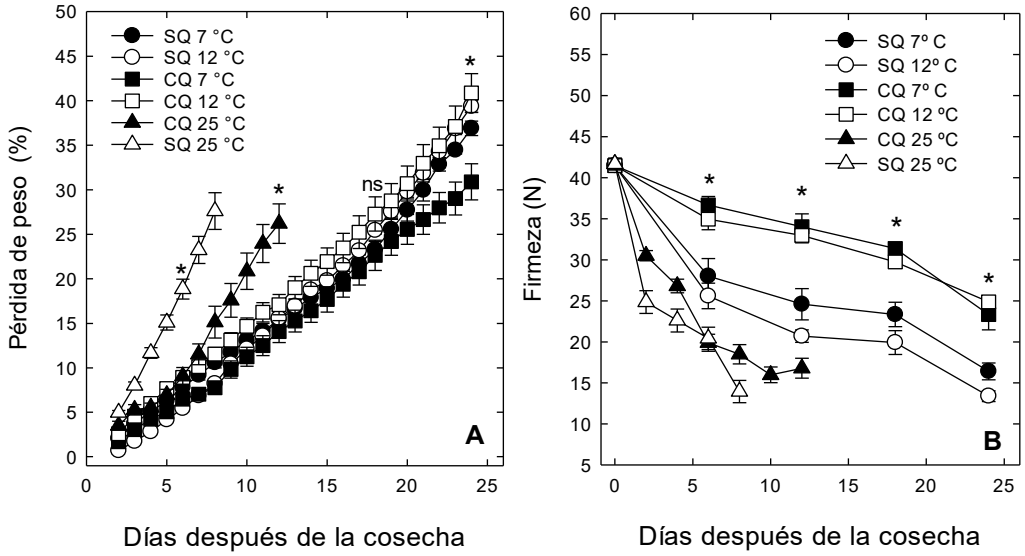

Figura 8. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

1.5.2.4. Color de epidermis del fruto

El color inicial de los frutos SQ a 25 °C de la ciruela mexicana 'Morada' cambio de frutos con tendencia al amarillo, de luminosidad mediana y opacos (L*= 36.3, C*= 15 y h°= 78.5) a un color tendiente al rojo con baja luminosidad, pero mayor pureza del color (L*= 31.8, C*= 32.3 y h°=39) después de seis días, posteriormente aun mostraron un mayor cambio al color rojo, menos luminoso y más opaco (Figura 10 A B C). En contraste los frutos mantenidos a 25 °C CQ mostraron un color tendiente al amarillo, con luminosidad baja constante y opaco con poco cambio durante el periodo de evaluación (L*= 34-37, C*= 13.5-17.6 y h° = 75.5-85) (Figura 10 A B C).

Por otra parte los frutos almacenados a baja temperatura CQ o SQ mostraron una retraso en los cambios de los parámetros de color, así se observó que los frutos almacenados a 12 °C CQ o SQ alcanzaron los parámetros de cromaticidad y matiz a los 11 y 16 d bajo esa condición, en tanto que los frutos almacenados a 7 °C CQ o SQ no alcanzaron el color tendiente al rojo aun después de los 24 d (h°= 54.1-65), lo

que sugiere que esta última temperatura puede afectar el desarrollo de los pigmentos que originan el color de la ciruela mexicana ‘Morada’ (Figura 10 A B C).

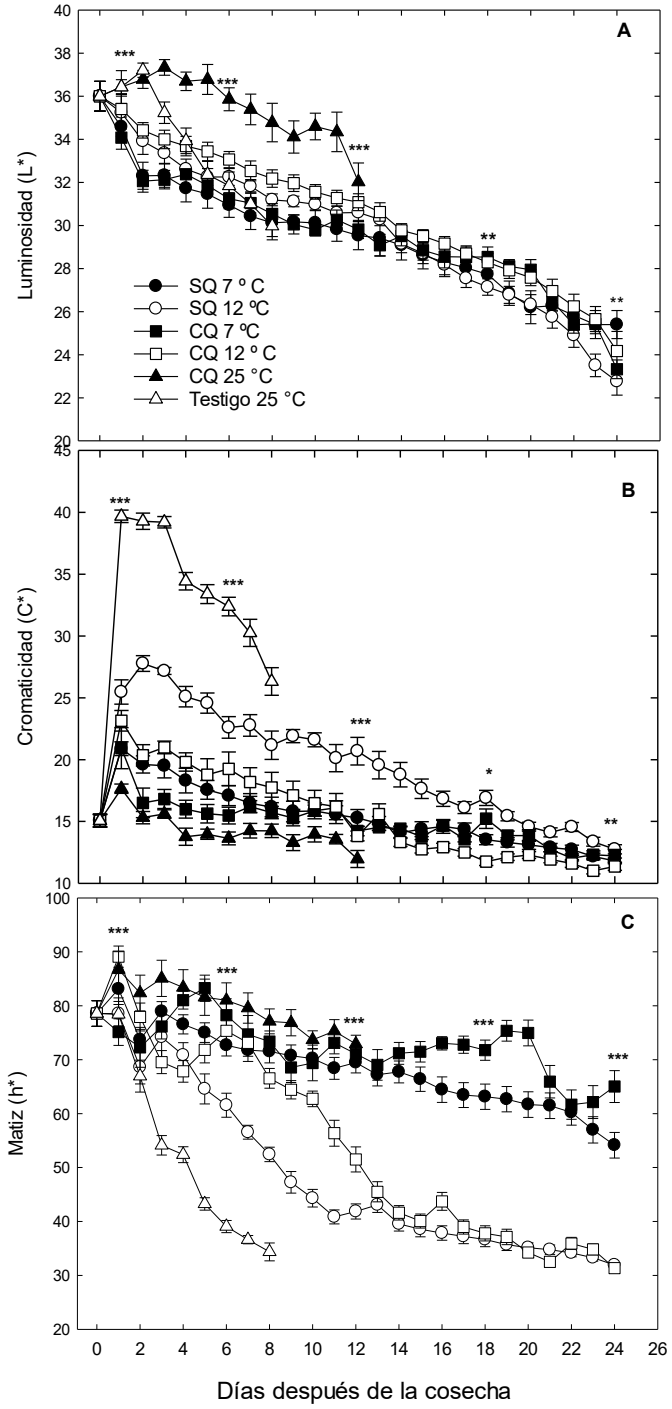

Figura 9. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana ‘Morada’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ)

almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.2.5 Sólidos solubles totales (SST)

Los SST de los frutos de ciruela mexicana 'Morada' inicio en 7.5 %, en los frutos almacenados a 25 °C SQ alcanzaron 16.1 % después de seis días y 16.8 % después de 8 días (Figura 11 A). Los frutos almacenados a 25 °C CQ, los SST solo alcanzaron entre 9.8 y 12.8 % a los seis y 12 d de almacenamiento (Figura 11 A). En los frutos almacenados a 7 °C CQ se detectó la menor acumulación de SST, sin superar los 11.4 % después de 24 d; seguido de los frutos almacenados a 7 °C CQ quienes alcanzaron 13.8 % después de 24 d y finalmente los frutos almacenados a 12 °C CQ o SQ mostraron SST entre 13.9 y 13.6 % después de 24 d (Figura 11 A). Los resultados sugieren que la baja temperatura y la aplicación de quitosano retrasaron el proceso de acumulación de SST.

1.5.2.6. Acidez titulable (AT)

La AT en los frutos almacenados a 25 °C se incrementó de 0.78 % al inicio del experimento a 1.16 % al 6 d (Figura 11 B). En los frutos CQ a 25 °C la AT se incrementó significativamente al día 6 a 0.85 % y al d 12 se alcanzó 1.66 % (Figura 11 B). En los frutos almacenados a baja temperatura, la AT se incrementó durante el periodo de almacenamiento, pero con menor AT en los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ comparado con los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ, así en el día 18 se observó que los frutos almacenados a 7 °C tuvieron entre 1.33 y 1.39 % de AT, mientras que los frutos almacenados a 12 °C la AT estuvo entre 1.5 y 1.62 % (Figura 11B). Estos resultados sugieren que la baja temperatura retraso la acumulación de ácidos orgánicos que ocurren en la maduración de ciruela mexicana 'Morada' y que el quitosano de manera aditiva favorece el retraso de la acumulación de la AT.

1.5.2.7. Índice de sabor (IS)

El IS en los frutos almacenados a 25 °C SQ iniciaron con 9.67 %, posterior a seis días se incrementó hasta 14 % y aun a los 10 días se incrementó a 14.5 %; mientras que en los frutos almacenados a 25 °C CQ se alcanzó 11.73 % a los seis días y después disminuyó drásticamente hasta 7.42 % (Figura 11 C). En los frutos almacenados a baja temperatura el IS se mantuvo entre 8.31 y 10.0 % en el periodo de evaluación (24 días) con los valores significativamente menores en los frutos almacenados a 7 °C y 12 °C CQ (18 y 24 d) (Figura 11 C). Esto sugiere que la temperatura a 7 y 12 °C disminuyo el incremento del índice de sabor al favorecer el incremento de AT y menor acumulación de SST.

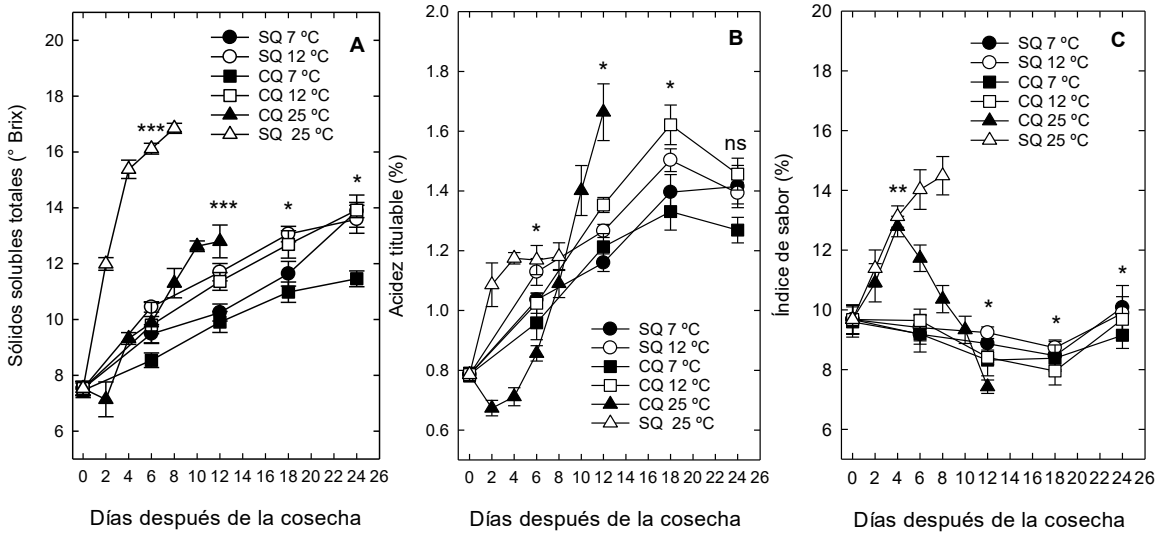

Figura 10. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Morada' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.2.8. Compuestos fenólicos

La concentración de compuestos fenólicos en los frutos almacenados a 25 °C SQ inicio con 167 mg EAG $100g^{-1}$ y se incrementó durante la maduración con valores de 180.1 mg EAG $100g^{-1}$ a los seis días y hasta 222.7 mg EAG $100g^{-1}$ a los 8 d (Figura 12 A). Los frutos CQ almacenados a 25 °C se comportaron de una manera similar con 152.3 mg EAG $100g^{-1}$ a los seis días y con un máximo de 222.35 mg EAG $100g^{-1}$ a los ocho días bajo esa condición (Figura 12 A). Las ciruelas almacenadas a baja temperatura se mantuvieron entre 106 y 135.5 mg EAG $100g^{-1}$ la concentración de los compuestos fenólicos, con mayor concentración en los frutos almacenados 7 °C CQ y la menor concentración en los frutos almacenados a 7 °C SQ (Figura 12 A). A los 24 d de almacenamiento a baja temperatura se detectó un incremento significativo en los compuestos fenólicos en todos los frutos almacenados a baja temperatura, alcanzando entre 171.2 y 196.1 mg EAG $100g^{-1}$, a excepción de los frutos almacenados a 7 °C SQ (Figura 12 A). Los resultados sugieren que La temperatura de 7 y 12 °C mostró un retraso en la síntesis de los compuestos fenólicos, y el quitosano ayudo en la protección de dichas moléculas ya que cuando se tuvo la menor temperatura y SQ los frutos carecieron de un aumento de la síntesis de estas moléculas.

1.5.2.9. Flavonoides totales

La concentración inicial de flavonoides totales fue de 45.4 mg EQ $100g^{-1}$ y en los frutos almacenados a 25 °C CQ o SQ disminuyeron constantemente hasta entre 36–37.6 mg EQ $100g^{-1}$ a los seis días bajo estas condiciones; posteriormente siguieron disminuyendo, pero en menor proporción (Figura 11 B). En contraste en los frutos almacenados a baja temperatura el contenido de flavonoides totales se incrementó a los seis días entre 48.6 – 56.7 mg EQ $100g^{-1}$(Figura 11B). Alcanzando un máximo entre 52.6 -64.3 mg EQ $100g^{-1}$ en los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ a los 18 d de evaluación y posteriormente disminuir ligeramente (Figura11 B). En los frutos almacenados a 12 °C SQ después de seis días de almacenamiento los flavonoides

totales disminuyeron constantemente hasta 38.3 mg EQ $100g^{-1}$ a los 24 d y en los frutos almacenados a 12 °C CQ mostraron una concentración constante de estas moléculas (Figura 11 B).

1.5.2.10. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP

La actividad antioxidante evaluada por el método de DPPH inicio con 242 mg EAA $100g^{-1}$ y después de seis días, en los frutos almacenados SQ a 25 °C, disminuyó a 233 mg EAA $100g^{-1}$ en días posteriores se mantuvo en los mismos niveles (Figura 11 C). En los frutos almacenados a 25 °C CQ se alcanzó un máximo de 414 mg EAA $100g^{-1}$ a los cuatro días y posteriormente disminuyó hasta 187.8 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días y se incrementó hasta 300 mg EAA $100g^{-1}$ a los 12 días (Figura 11 C). En los frutos almacenados a baja temperatura los flavonoides totales tuvieron una tendencia a disminuir, donde los frutos SQ tuvieron valores mayores de flavonoides, comparados con los frutos SQ sin importar si el almacenamiento fue a 7 o 12 °C (Figura 11 C).

En la actividad antioxidante evaluada por el método de ABTS los frutos SQ a 25 °C incrementaron de 421.2 mg EAA $100g^{-1}$ al inicio del experimento a 445.9 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días, sin cambios significativos en los días posteriores (Figura 11 D). En los frutos CQ a 25 °C la actividad antioxidante a los seis días fue de 463 mg EAA $100g^{-1}$ y se alcanzó un máximo a los 10 d de 485 mg EAA $100g^{-1}$, para posteriormente disminuir hasta 382.1 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 11 D). Los frutos almacenados a baja temperatura la actividad antioxidante por ABTS disminuyó constantemente, entre 314-351 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días, entre 316-346.8 mg EAA $100g^{-1}$ a los 18 d y entre 259y 309 mg EAA $100g^{-1}$ a los 24 d., donde los frutos almacenados a 12 °C SQ mostraron significativamente mayor actividad antioxidante por ABTS (Figura 11D).

Finalmente, la actividad antioxidante evaluada por el método FRAP, mostró un incremento significativo durante la maduración de los frutos almacenados a 25 °C CQ o SQ, alcanzando hasta 777 mg EAA $100g^{-1}$ y 7333 mg EAA $100g^{-1}$,

respectivamente (Figura 11E). en los frutos almacenados a 7 °C y 12 °C la actividad antioxidante no se incrementó, manteniéndose entre 316.9 y 422.6 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 11E).

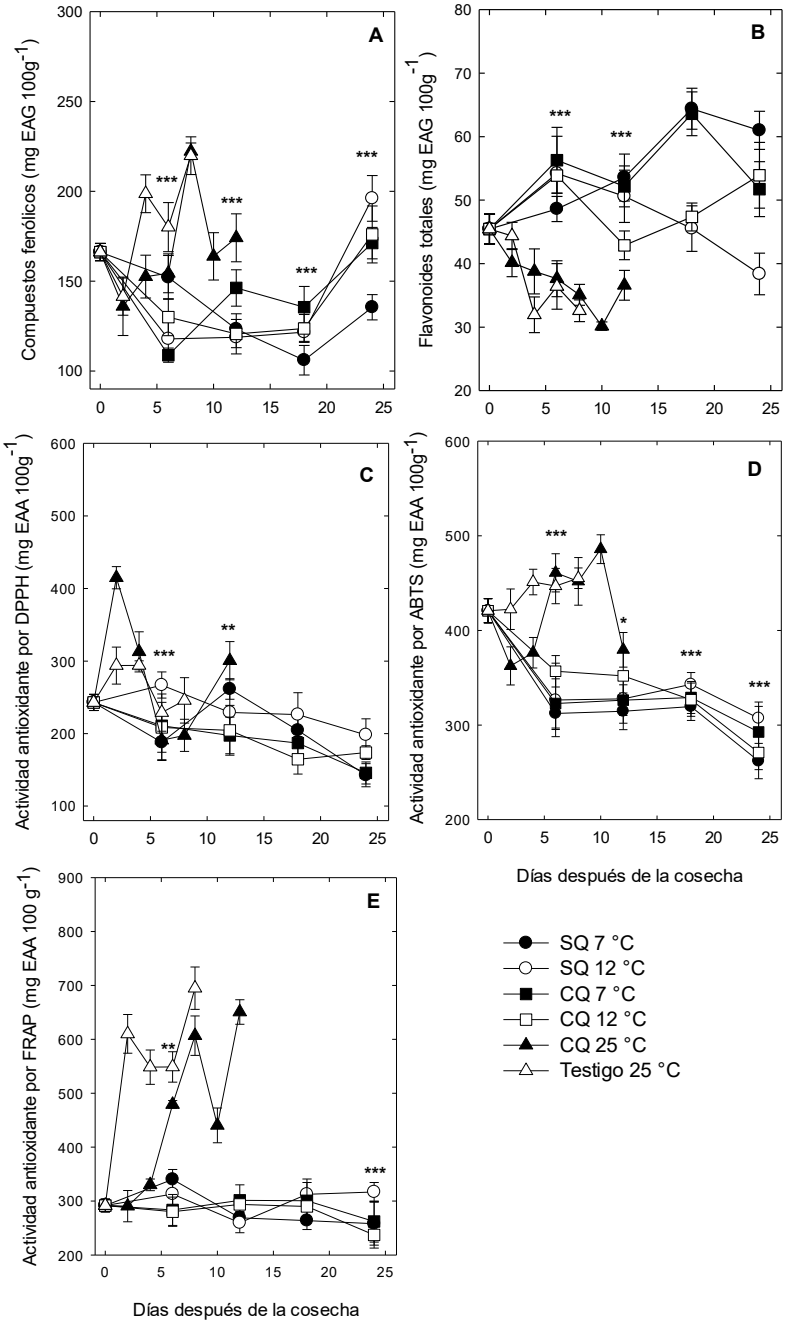

Figura 12. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (E) de frutos de ciruela mexicana 'Morada' con

y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

Los resultados sugieren que a temperatura ambiente la actividad antioxidante evaluadas por los tres métodos se incrementó significativamente y que la aplicación de quitosano retraso dicho aumento, mientras que a baja temperatura la actividad antioxidante se reduce o inhibe significativamente (Figura 11).

1.5.3 'Roja'

1.5.3.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

Los frutos de ciruela mexicana 'Roja' SQ almacenados a 25 °C mostraron el máximo de velocidad de respiración (3.1 mL $kg^{-1}h^{-1}$) al octavo día mismo día en el que finalizó su vida comercial (Figura 14 F). Los frutos CQ a 25 °C alcanzaron la mayor velocidad de respiración al noveno día y el final de la evaluación fue hasta el 10 d (Figura 14 E). El máximo de velocidad de respiración en las ciruelas (CQ y SQ) almacenados a 7 °C se presentó el noveno día de evaluación con 3 y 3.3 mL $kg^{-1}h^{-1}$, posteriormente en los frutos SQ la respiración se mantuvo entre 2.4 y 3.7 mL $kg^{-1}h^{-1}$, mientras que en los frutos CQ se mantuvieron entre 1.8 y 2.8 mL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figuras 14 A y C). La respiración en frutos (CQ y SQ) a 12 °C, mantuvieron vida comercial hasta el 20 d, llegando al climaterio al noveno día con 2.7 y 3 mL $kg^{-1}h^{-1}$, respectivamente, manteniendo la respiración los días posteriores al máximo climatérico (Figura 14 B y D). Los resultados sugieren que la respiración fue afectada por la temperatura de almacenamiento, disminuyéndola al reducir la temperatura y el quitosano también favoreció esa disminución.

La producción máxima de etileno en los frutos de ciruela mexicana 'Roja' almacenada a 25 °C SQ fue el tercer día de evaluación (295.8 μL $kg^{-1}h^{-1}$) posteriormente se observó otro incremento de menor intensidad a los seis días (164.2 μL $kg^{-1}h^{-1}$) (Figura 14 F). Los frutos de ciruela CQ a 25 °C alcanzaron la máxima producción de etileno al noveno día con 124.4 μL kg-$^{1}h^{-1,}$ de una intensidad

menor en 50 % comparado con los frutos SQ almacenados a la misma temperatura (Figura 15 E). En los frutos almacenados a 7 °C SQ se detectó la producción de etileno desde el cuarto día de la evaluación, alcanzando el máximo en el 9 d con 129.4 mL $kg^{-1}h^{-1}$ mientras que en los frutos almacenados a 7 °C CQ el máximo de producción fue en el día 13 con 186.75 μL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figura 14 A). En los frutos SQ a 12 °C, se detectó etileno desde el segundo día, con dos máximos de producción a los cinco y 10 d, de 118.7 μL kg-$^{1}h^{-1}$ y 167.4 mL kg-$^{1}h^{-1,}$ respectivamente (Figura 14 B). En los frutos CQ a 12 °C se presentó etileno hasta el octavo día con 156.8 μL kg-$^{1}h^{-1}$ y el máximo de producción fue a los 15 d con 365.8 μL kg-$^{1}h^{-1}$ (Figura D).

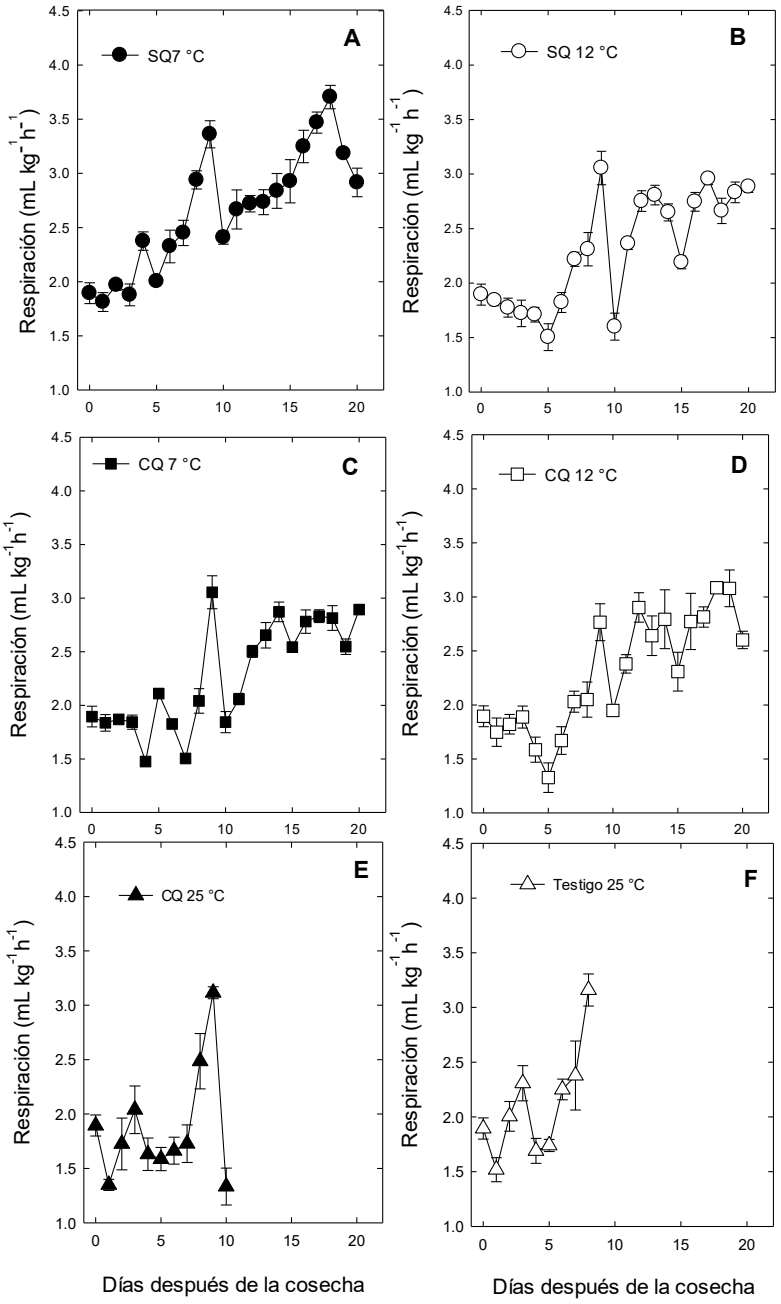

Figura 13. Velocidad de respiración (A, B, C, D, E, F) en frutos de ciruela mexicana ’Roja’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

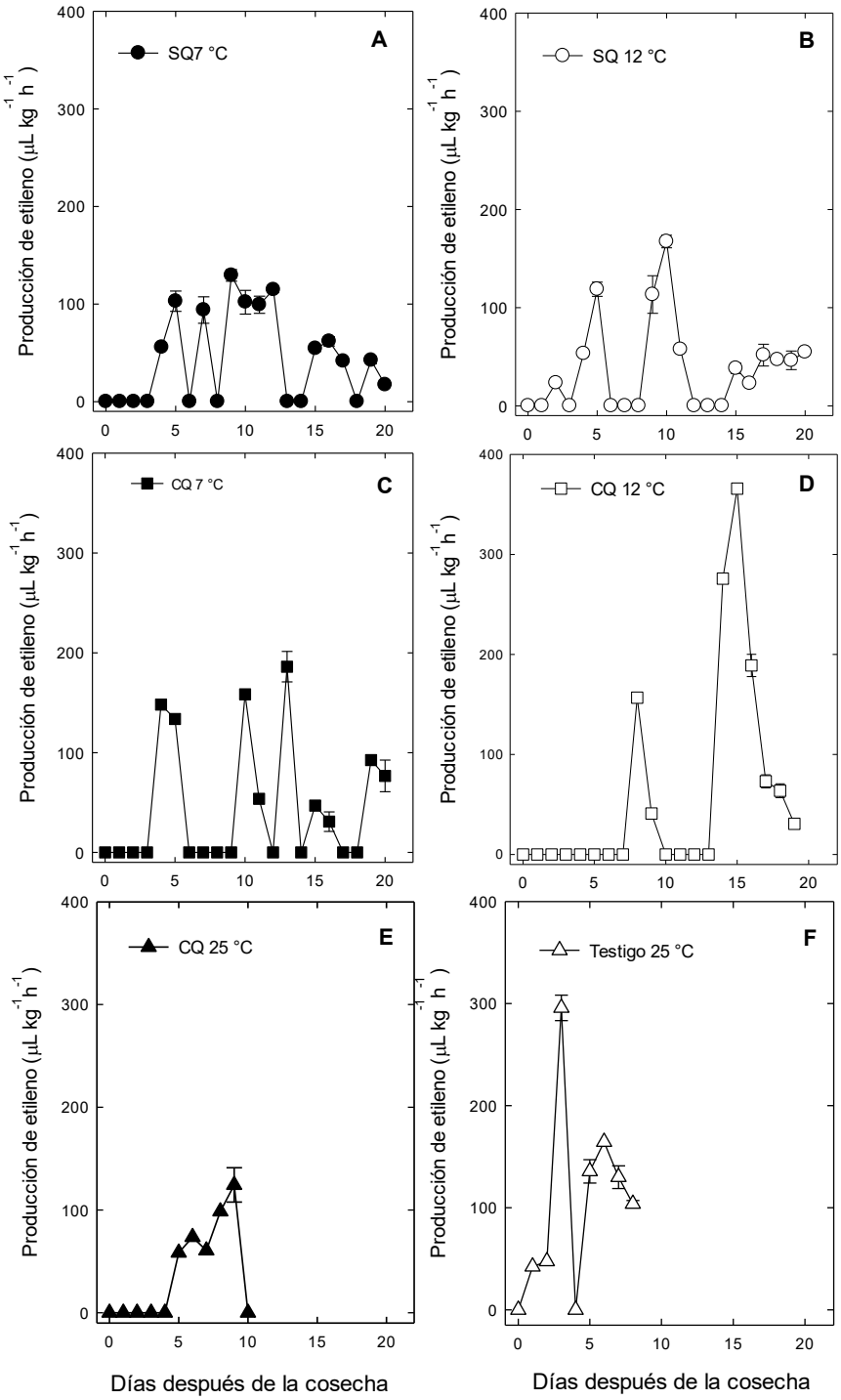

Figura 14. Producción de etileno (A, B, C D, E, F) en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

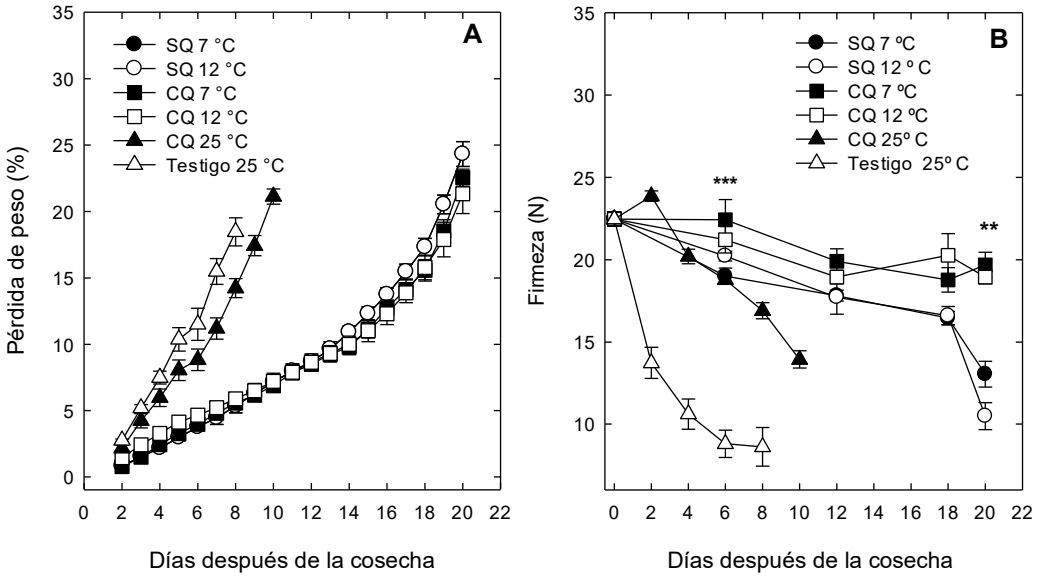

Figura 15. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.3.2. Pérdida de peso acumulada

Los frutos almacenados a 25 °C SQ mostraron una pérdida de peso de 11.5 % a los seis días, alcanzando hasta 18.4 % a los 8 d; similar tendencia, pero significativamente mostró una menor pérdida de peso en los frutos almacenados a 25 °C CQ a los seis días con 8.8 %, y a los 10 d la pérdida de peso fue de 21.1 % (Figura 15 A). En los frutos almacenados a 7 y 12 °C CQ y SQ no se detectaron diferencias entre ellos, la pérdida de peso fue entre 3.7-4.6 % a los seis días, entre 8.7–9.5 % a los 12 d, entre 15.5 y 17.3 a los 18 d y entre 21.33 y 24.3 % a los 20 d (Figura 15 A).

1.5.3.3. Firmeza de pulpa

La firmeza de las ciruelas almacenadas a 25 °C SQ, disminuyó de 22.6 N en el día inicial hasta 8.8 N a los seis días de evaluación, mientras que en los frutos CQ a 25

°C la firmeza mostró valores de 18.8 N a los seis días; posteriormente estos últimos frutos llegaron a 13.9 N al 10 d (Figura 16 B). En frutos SQ a 7 y 12 °C, mostraron una firmeza entre 19 y 22.2 N en el sexto día, entre 17. 8 y 19.9 N en el doceavo día y entre 16. 4 y 20.4 N en el día 18; ya en el día 20 se observó que los frutos almacenados a 12 °C tuvieron menor firmeza comparados con los frutos almacenados a 7 °C, sin importar la aplicación o no de quitosano (Figura 16 B).

Los resultados indican que la refrigeración a baja temperatura mantiene la firmeza del fruto en mayor proporción y con mayor tiempo, mientras que el quitosano favoreció una menor velocidad de maduración y pérdida de peso.

1.5.3.4. Color de epidermis del fruto

El color de los frutos almacenados a 25 °C SQ al momento de iniciar el experimento fue tendiente al verde con luminosidad baja y opaco (L*=41.3, C*=27.8 y h° =97.9) y después de seis días el color fue tendiente al rojo con baja luminosidad y mayor pureza (L*=30, C*=30 y h°=33.8) y dos días después los frutos mostraron mayor tendencia al rojo, con menor luminosidad y más opaco (L*= 27.6, C*= 26.7 y h°= 28.3; figura 17). En los frutos donde se aplicó quitosano y se almacenaron a 25 °C se observó un retraso en los cambios de los parámetros de color y menor desarrollo del color rojo opaco y de luminosidad baja (L=31.6, C*= 19.4 y h°= 40.7; Figura 17).

El almacenamiento a temperatura baja y aplicación de quitosano retraso aún más el desarrollo del color de los frutos de ciruela mexicana ‘Roja’, así a los 18 d los frutos almacenados a 7 °C mostraron un color tendiente al amarillo, opaco y poco luminoso (L*=31.6-37.7, C*= 20.7-23.7 y h°=71-78; Figura 17) y los frutos almacenados a 12 °C tenían un color con tendencia al rojo, opaco y poco luminoso (L= 32.8-33.6, C*= 18-22 y h°=47-47.7; Figura 17). Los resultados sugieren que a temperatura ambiente los frutos donde se aplicó quitosano retraso el desarrollo del color y a baja temperatura el almacenamiento inhibió el desarrollo de los pigmentos que definen el color de la ciruela mexicana ‘Roja’.

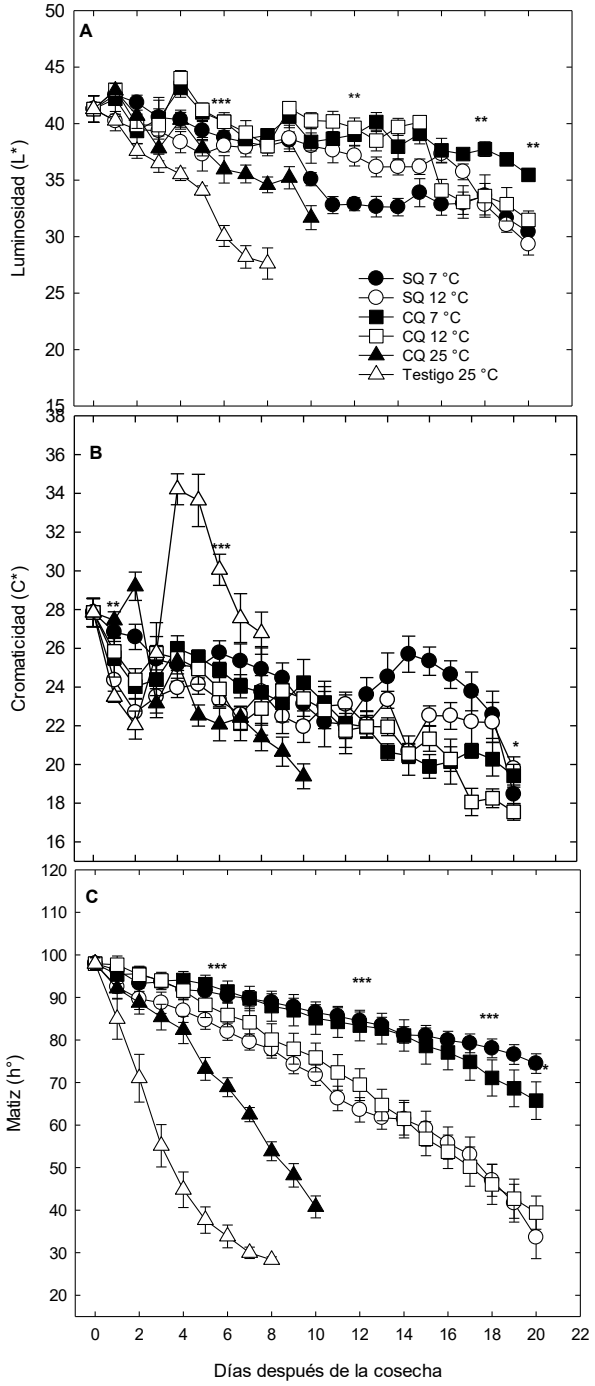

Figura 16. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.3.5. Sólidos solubles totales (SST)

En frutos almacenados a 25 °C SQ los SST se incrementó de 7.7 °Brix al inicio del experimento a 14.6 °Brix en el sexto día y alcanzaron 15.9 °Brix en el décimo día (Figura 18A). En los frutos almacenados a 25 °C CQ en el sexto día mostraron 10.3 y a los 10 d alcanzaron 13.3 °Brix (Figura 18A). Los frutos CQ o SQ almacenados a 7 °C acumularon la menor cantidad de sólidos solubles totales, así en el sexto día de evaluación tuvieron entre 7.4 y 8.6 °Brix, en el doceavo día entre 8.5 y 9 °Brix, llegando a valores máximos de 10.5-11.4 °Brix a los 20 d de evaluación (Figura 18A). Finalmente, los frutos CQ y SQ almacenados a 12 °C incrementaron los SST a 9.5 °Brix en el sexto día, entre 11.1 y 12.3 °Brix al 12 d, llegando a entre 12.2-13.1 °Brix a los 18 d (Figura 18 A). Los resultados sugieren que la aplicación de quitosano retraso la acumulación de SST a temperatura ambiente y que la menor temperatura de almacenamiento (7 °C) inhibió en gran proporción la acumulación de SST.

1.5.3.6. Acidez titulable (AT)

La AT inicial en los frutos de ciruela mexicana ‘Roja’ fue de 1.08 %; y en los frutos almacenados a 25 °C se detectó un incremento significativo al segundo día de evaluación (1.28 %) para posteriormente mantenerse entre 1.0 y 1.19 % los días posteriores (Figura 18 B). La AT en los frutos CQ a 25 °C descendió hasta 0.94 % en el cuarto día de la evaluación y posteriormente hasta alcanzar entre 1.16 y 1.23 % entre los días 6-10 de evaluación (Figura 18 B). Los frutos CQ o SQ almacenados a 7 °C disminuyeron la AT entre 0.83 y 0.95 % en sexto día de evaluación, en el día 12 de evaluación la AT fue entre 0.89 y 1.0 % y en entre el día 18 y 20 % la AT aumento entre 1.0 y 1.25 % (Figura 18 B). En contraste los frutos SQ y CQ a 12 °C mantuvieron la AT entre 1.12 y 1.27 % durante el periodo de 6 a 20 d de almacenamiento en esa condición (Figura 18 B). Estos resultados confirman que a temperatura ambiente el quitosano retraso los cambios de la AT y el almacenamiento a 7 °C retraso significativamente la acumulación de AT.

1.5.3.7. índice de sabor (IS)

El IS inicial fue de 6.63 %, y en los frutos almacenados a 25 °C SQ se incrementó constantemente hasta 14.4 % a los seis días de evaluación, en los frutos almacenados a 25 °C CQ se detectó un incremento del IS a los 4 y 10 d de evaluación, con valores de 10.2 y 11.5 %, respectivamente (Figura 18C). En los frutos almacenados a 7 o 12 °C CQ o SQ no se detectaron diferencias significativas entre ellos bajo esas condiciones, la tendencia del IS de sabor fue de incrementarse a excepción de los frutos almacenados a 7 °C CQ que mantuvo valores entre 8.3 y 9.4 % durante el periodo de evaluación; el resto de los frutos almacenados a 7 °C SQ o 12 °C CQ o SQ alcanzaron hasta entre 10 y 11.4 % de IS, sin detectarse diferencias significativas (Figura 18 C). Los resultados indican que la refrigeración y aplicación de quitosano disminuyeron el IS de los frutos de ciruela 'Roja'.

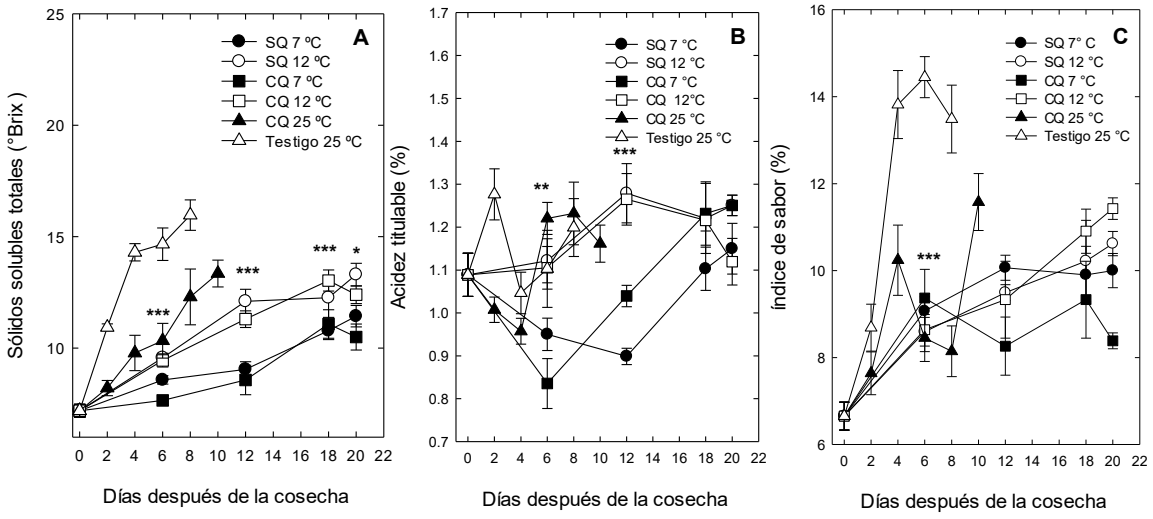

Figura 17. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.5.3.8. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos aumentaron durante la maduración, el día inicial se cuantificaron 97.68 mg EAG $100g^{-1}$, y en los frutos almacenados a 25 °C SQ llegaron a 359.24 -337.9 mg EAG $100g^{-1}$ a los cuatro y seis días de evaluación (Figura 19 A). Similar tendencia se observó en los frutos CQ 25 °C donde los compuestos fenólicos se incrementaron a 246 mg EAG $100g^{-1}$ a los seis días de evaluación, pero el máximo de acumulación fue a los 10 d acumulando 331.96 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 19A). En los frutos SQ a 7 °C, los compuestos fenólicos disminuyeron en el día seis de evaluación a 81.91 mg EAG $100g^{-1}$, aumentando a 262.84 mg EAG $100g^{-1}$ después de 18 d bajo esta condición (Figura 19 A).

En frutos SQ a 12 °C los compuestos fenólicos presentaron similar tendencia con valores de 167.53 mg EAG $100g^{-1}$ al sexto día llegando a 293.06 mg EAG $100g^{-1}$ a los 18 d (Figura 19 A). Los compuestos fenólicos en las ciruelas CQ a 7 °C presentaron un aumento desde el sexto y doceavo día de evaluación con 181.93 y 195.34 mg EAG $100g^{-1}$, respectivamente y aun a los 18 d se cuantificó un incremento de 278.5 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 19A). En frutos CQ 12 °C en el 6 d aumentaron estos compuestos a 147.01 mg EAG $100g^{-1}$, aumentando hasta 296.89 y 358.76 mg EAG $100g^{-1}$ a los 18 y 20 d (Figura 19A). Los resultados sugieren que la baja temperatura y aplicación de quitosano retrasan la acumulación de estas moléculas.

1.5.3.9. Flavonoides totales

La concentración inicial de los flavonoides totales en la ciruela mexicana 'Roja' fue de 62.2 mg EQ 100 g^{-1} (Figura 19B). En los frutos almacenados a 25 °C SQ incrementaron a 77.50 mg EAG $100g^{-1}$ a los dos días de evaluación y posteriormente disminuyeron constantemente hasta 44.07-37.31 EQ $100g^{-1}$ al día 6-8 de evaluación (Figura 19B). En tanto que los frutos almacenados a 25 °C CQ mostraron un comportamiento descendente los primeros seis días de evaluación con valores entre 40.9 y 47.2 mg EQ $100g^{-1}$, posteriormente en el día 8 alcanzó hasta 66.68 mg EQ $100g^{-1}$ y volvió a disminuir a 43.79 mg EQ $100g^{-1}$ en el décimo día de evaluación (Figura 19 B).

En los frutos SQ 7 °C los flavonoides totales aumentaron significativamente hasta 85.7 mg EQ $100g^{-1}$ al sexto día de evaluación, posteriormente disminuyeron constantemente hasta 53.2 y 37.89 mg EQ 100 g^{-1} a los 18 y 20 d (Figura 19 B). Los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ mostraron un comportamiento similar, ya que inicialmente aumentaron entre 67.9 y 71.9 mg EQ $100g^{-1}$ a los seis días, posteriormente a los 12 d disminuyeron a 39.5-50.8 mg EQ $100g^{-1}$ y en el día 18 de evaluación entre 37.4 y 57.6 mg EQ $100g^{-1}$ (Figura 19 B). Los resultados sugieren que la refrigeración a baja temperatura retrasa los cambios de los flavonoides y el quitosano favorece el retraso en combinación con la temperatura (Figura 19 B).

1.5.3.10. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP

La actividad antioxidante evaluada por el método de DPPH aumento en los frutos madurados a 25 °C SQ, iniciando con 252 mg EAA $100g^{-1}$ y después de seis días alcanzó 433.93 EAA 100 g^{-1} (Figura 19 C). Similar tendencia mostró los frutos almacenados CQ a 25 °C, solo que el máximo se alcanzó a los diez días con 373.29 EAA $100g^{-1}$(Figura 19C). La refrigeración a 7 o 12 °C SQ retraso el incremento de la actividad antioxidante DPPH por 12 d, ya que la mayor actividad se cuantifico a los 18 d, donde los frutos almacenados a 12 °C alcanzaron valores similares a los frutos SQ a 25 °C, y los frutos almacenados a 7 °C SQ no superaron los 270 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 19 C). En los frutos almacenados a 7 o 12 °C CQ la máxima actividad fue a los 18 o seis días sin superar los 329.4 y 300.1 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 19 C).

La actividad antioxidante evaluada por el método de ABTS fue similar en todos los tratamientos evaluados, diferenciándose en la intensidad y tiempo de ocurrencia (Figura 19 D). Así, en los frutos considerados testigo o aquellos que fueron almacenados a 25 °C SQ inicialmente la actividad por ABTS fue cuantificada en 256.4 mg EAA $100g^{-1}$, y se incrementó constantemente hasta alcanzar 471. 3 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días y posteriormente disminuir drásticamente hasta 270.5 mg EAA $100g^{-1}$ a los 8 días de evaluación (Figura 19 D). Los frutos mostraron un comportamiento parecido a los almacenados a 25 °C CQ, con la diferencia que el máximo ocurrió a los 8 d de evaluación con una menor intensidad (378.2 mg EAA

$100g^{-1}$) (Figura 19 D). Los frutos almacenados a 12 °C CQ o SQ mostraron similar comportamiento, alcanzando su máximo de actividad ABTS a los 12 d con 382 y 395.1 mg EAA $100g^{-1}$, respectivamente; en tanto que los frutos almacenados a 7 °C CQ o SQ el máximo de actividad ABTS se detectó a los 18 d con 268.3 y 373.1 mg EAA 100 g^{-1}, con mayor actividad en los frutos SQ (Figura 19 D).

Finalmente, la actividad evaluada por FRAP inicialmente se cuantificó 146.3 mg EAA $100g^{-1}$, posteriormente a los seis días en los frutos almacenados a 25 °C SQ los valores se incrementaron a 247.2 mg EAA $100g^{-1}$ para posteriormente disminuir, mientras que en los frutos almacenados a 25 °C CQ el máximo de actividad FRAP se detectó a los 8 d con 225.3 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 19E). en los frutos en refrigeración a 7 °C SQ la actividad se mantuvo entre 211.8 y 220.1 mg EAA $100g^{-1}$ durante 18 d, en tanto que los frutos almacenados a 7 °C SQ se detectó un máximo de actividad FRAP a los 12 d con 202.9 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 19 E). Los frutos a 12 °C mostraron un comportamiento contrastante, ya que aquellos almacenados a 12 °C CQ tuvieron la menor actividad, entre 107.7 y 142.3 mg EAA $100g^{-1}$ durante 18 días, y los frutos a 12 °C SQ mostraron un máximo a los 12 d con 233.2 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 19 E).

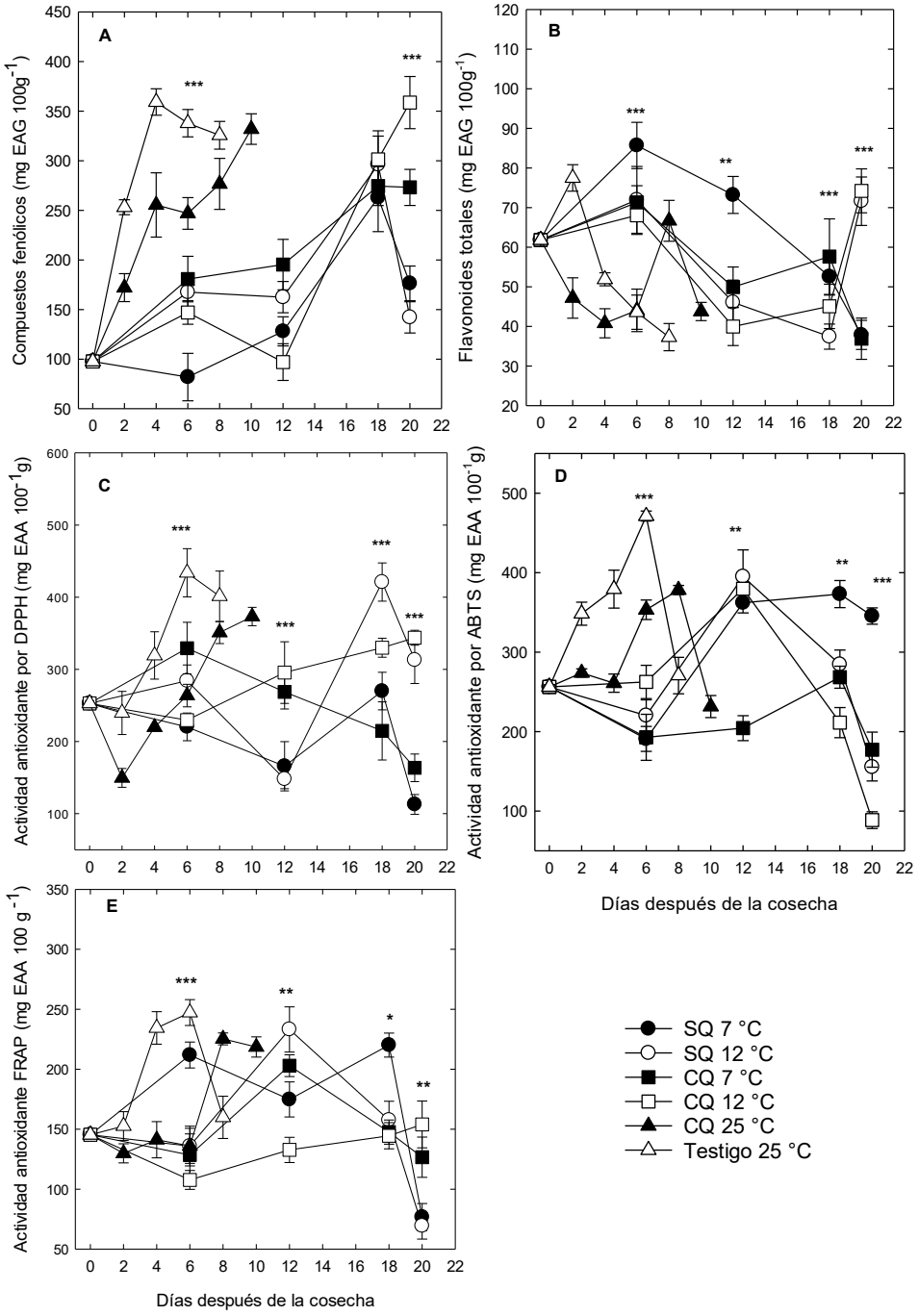

Figura 18. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

1.5.4. 'Amarilla'

1.5.4.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

El máximo climatérico en los frutos almacenados a 25 °C SQ se presentó al cuarto día con 3.92 mL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figura 21 F). En los frutos CQ a 25 °C el climaterio se detectó a los 8 días con 3.54 mL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figura 21 E). En los frutos almacenados 7 °C SQ o CQ el máximo climaterio se determinó a los 16 d con 3.45 y 3.00 mL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figura 21 A-C). En los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ el máximo de respiración de detectó a los 13 y 10 d con valores de 3.57 y 3.05 $mL^{-1}kg^{-}$ (Figura 21 B). Los resultados indican que a temperatura ambiente el quitosano retraso el máximo climatérico, pero a baja temperatura no se observó este efecto; pero tanto a temperatura ambiente como en refrigeración la intensidad de respiración se redujo entre 10 y 16 % en los frutos CQ comparado con los frutos SQ.

La producción de etileno en los frutos considerados testigo o almacenados a 25 °C SQ presentó su máxima producción de etileno 232.81 µL kg^{-1} h^{-1} a los cinco días de evaluación (Figura 22 F), mientras que los frutos CQ en la misma condición de almacenamiento mostró su máximo climaterio a los seis días con 140. 85 µL kg^{-1} h^{-1} (Figura 22 E). En los frutos almacenados a 7 SQ o CQ el máximo se detectó a los 12 d con máximos de 232.8 y 140.8 µL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figura 22 A-C). En tanto que en los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ el máximo climaterio se detectó a los 10 d con 116.3 y 104.8 µL $kg^{-1}h^{-1}$ (Figura 22 B-D). Los resultados sugieren nuevamente que se retrasó la producción de etileno a temperatura ambiente por la aplicación de quitosano y que al disminuir la temperatura de refrigeración el día del máximo de producción de etileno se retrasa y con la combinación de quitosano la intensidad del pico climatérico disminuye entre 10 y 14 %.

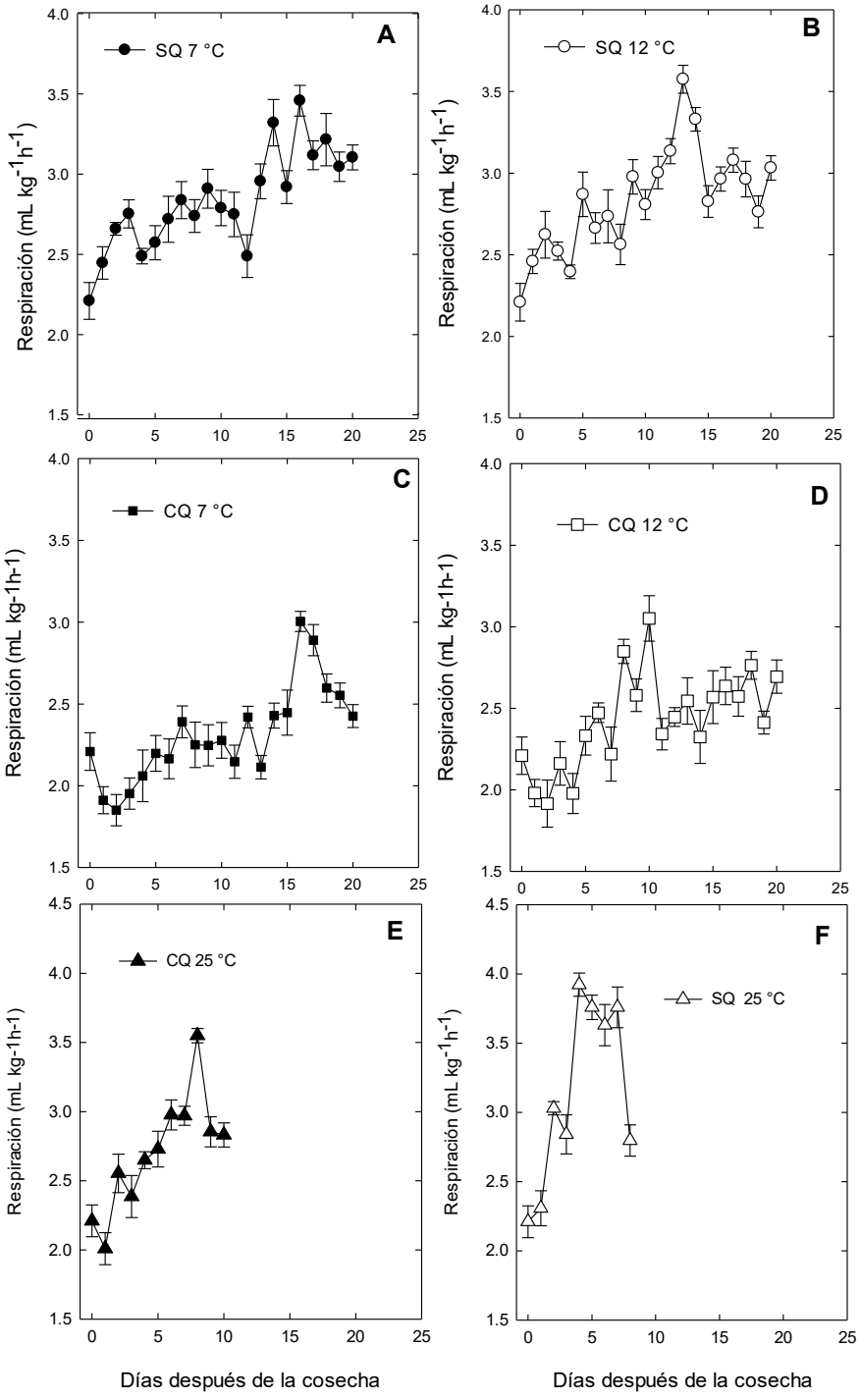

Figura 19. Velocidad de respiración en frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

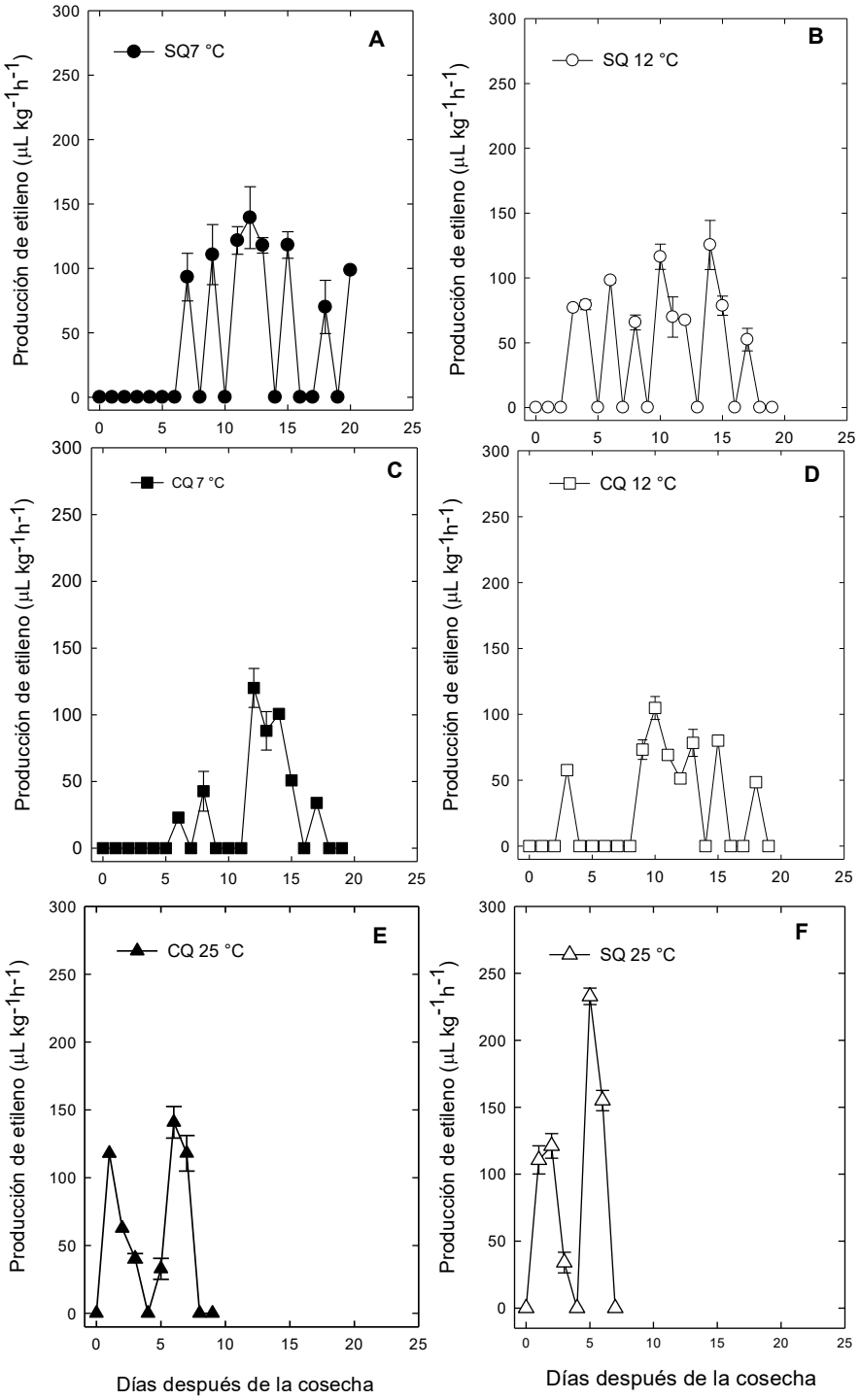

Figura 20. Producción de etileno en frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

1.5.4.2. Pérdida de peso acumulada

El porcentaje de pérdida de peso en los frutos almacenados a 25 °C SQ fue de 12.5 % al sexto día, incrementando hasta 17.65 % al 8 d (Figura 23 A). En los frutos almacenados a 25 °C CQ la pérdida de peso al sexto día fue de 8.7 % y al décimo día de 15.9 % (Figura 23 A). La aplicación de quitosano retrasó la pérdida de peso ya que los frutos almacenados a 7 o 12 °C CQ tuvieron entre 7.1 y 8.6 % a día 12 y entre 13.2 y 13.8 % a los 18 d, esto fue significativamente menos que los frutos almacenados a 7 y 12 °C SQ que tuvieron entre 11.5 y 11.9 % a los 12 d y entre 20.5 y 23.1 % a los 18 d (Figura 23 A). Los resultados sugieren que la aplicación de quitosano restringió fuertemente la pérdida de peso a temperatura ambiente y en refrigeración.

1.5.4.3. Firmeza de pulpa

La firmeza en los frutos testigo inició con 20.89 N, disminuyendo significativamente hasta 7.45 N al d 6 y 5.45 N al d 8 (Figura 23 B). En los frutos CQ 25 °C la firmeza fue de 11.30 N al 6 d y 7 N al 10 d (Figura 23 B). En frutos SQ a 7 y 12 °C los resultados fueron de 18.84 N y 16.16 N al 12 d, disminuyendo a 12.34 y 13 N a los 18 d (Figura 23 B). En los tratamientos CQ a 7 y 12 °C se mantuvo la firmeza de 20.23 y 16.16 N al d 12 y de 16.3 y 17.05 N a los 18 d (Figura 23 B). Estos resultados confirman el efecto del quitosano en retrasar la pérdida de peso a temperatura ambiente y durante el almacenamiento en baja temperatura (Figura 23 B).

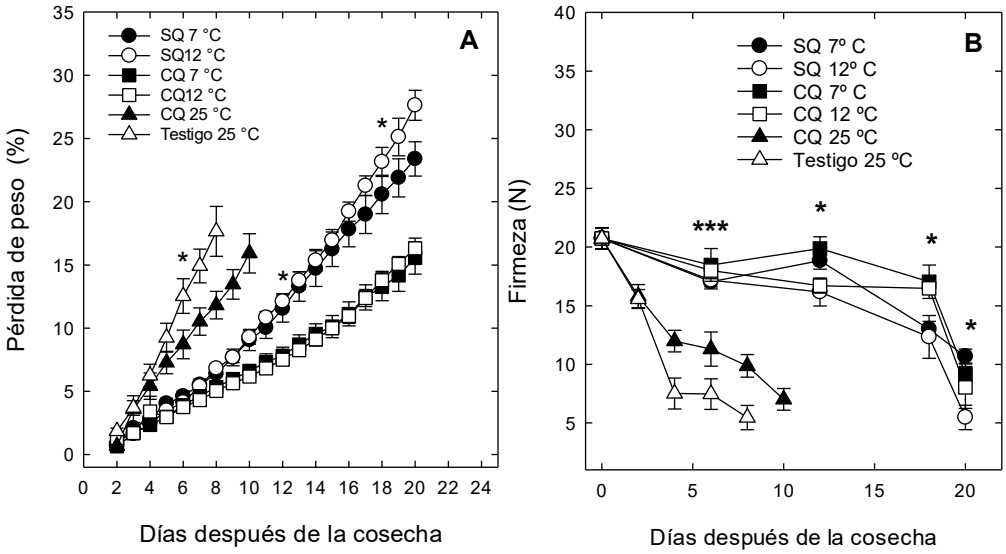

Figura 21. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001.(ns) no significativo.

1.5.4.4. Color de epidermis del fruto

El color de los frutos almacenados a 25 °C SQ cambiaron de amarillo, luminoso y medianamente opaco (L*= 56.5, C*= 41.1 y h°= 94.1) a un color tendiente al naranja menos luminoso y opaco (L*=49.4, C*=41.3 y h°=70.9) después de seis días (Figura 24). Los frutos CQ a 25 °C mostraron una velocidad menor en el cambio de los parámetros de color, ya que al sexto día el color fue muy cercano al amarillo, medianamente luminoso y opaco (L*=52.4, C*=38.9 y h°=92.7) y se acercaron más al color tendiente al naranja hasta el décimo día, pero sin alcanzar los valores de las ciruelas almacenadas SQ a 25 °C y menos luminoso y más opaco (L*= 47.6, C*= 32 y h°= 81.7; Figura 24).

En los frutos almacenados a baja temperatura se observó que los frutos almacenados a 7 °C mantuvieron el color cercano al amarillo (h°= 84.1-93.7) durante los 20 d de evaluación, aunque los frutos SQ mostraron significativamente mayor luminosidad y cromaticidad que aquellos CQ (Figura 24). Los frutos almacenados a 12 °C tuvieron cambios de color hacia el naranja (h°=66.9 y 74.4) después de 16-18 d, con mayor luminosidad y pureza del color en los frutos SQ (figura 24). Estos resultados indican que la baja temperatura evaluada y la aplicación de quitosano retrasan significativamente los cambios de color en la ciruela mexicana 'Amarilla'.

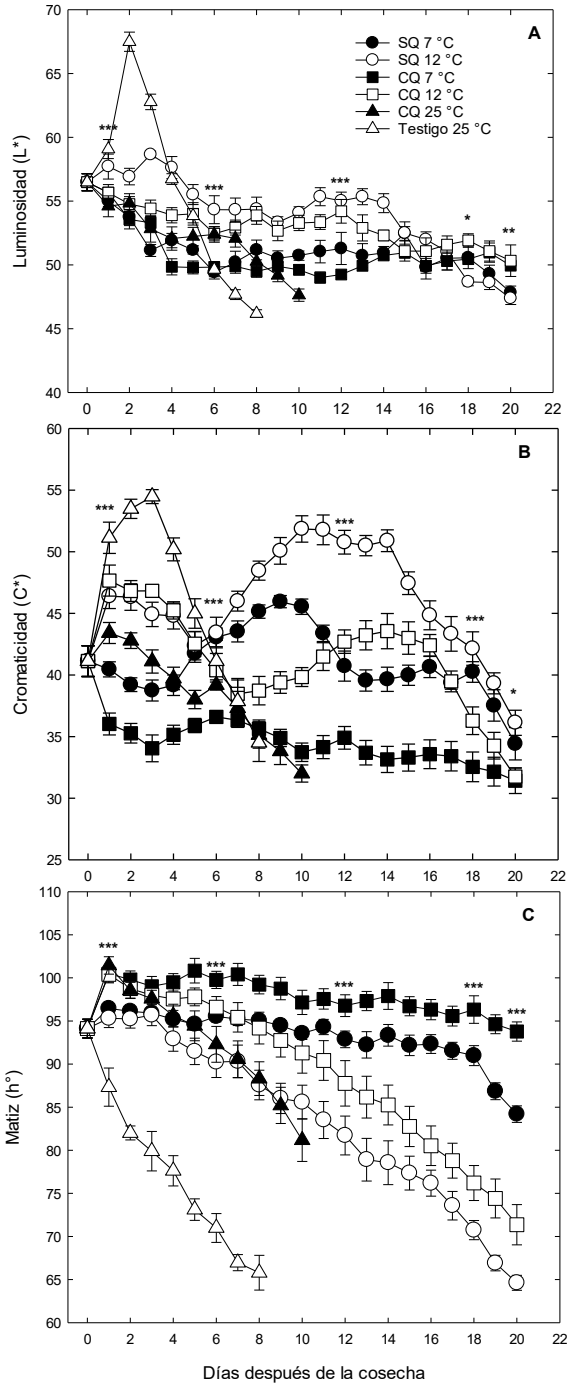

Figura 22. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y

su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo,

1.5.4.5. Sólidos solubles totales (SST)

La concentración inicial de SST en la ciruela 'Amarilla' fue de 8.5 °Brix, y en los frutos testigo o almacenados SQ a 25 °C se incrementó a 16.0 °Brix al 6 d, mientras que en los frutos CQ 25 °C se alcanzaron 15.8 °Brix hasta los 8 d (Figura 23 A). La refrigeración y aplicación de quitosano retraso e inhibió en cierta proporción la acumulación de los SST (Figura 23 A). Así, los frutos SQ o CQ almacenados a 12 °C tuvieron entre 10.1 y 10.6 °Brix a los 6 d, entre 11.7 y 12.9 °Brix a los 12 d y entre 12.4 y 13.6 °Brix a los 18 d; en tanto que los frutos SQ o CQ almacenados a 7 °C tuvieron entre 9.3 y 9.8 ° Brix a los 6 d, entre 9.4 y 10.3 °Brix a los 12 d y entre 10.5 y 11.1 °Brix a los 18 d (Figura 23 A). Estos resultados indican claramente que el quitosano retraso la acumulación de los SST y la menor temperatura inhibe en mayor proporción el incremento de los SST durante la maduración.

1.5.4.6. Acidez titulable (AT)

La AT inicial en los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' fue 0.63 %, en los frutos almacenados a 25 °C SQ se incrementó a 0.70 % a los 2 d y posteriormente disminuyó constantemente hasta 0.51 % al 6 d (Figura 23B). Los frutos CQ a 25 °C mostraron una disminución constante de la AT alcanzando 0.51 % al 6 d (Figura 23 B). En los frutos almacenados a baja temperatura a 7 y 12 °C CQ o SQ mostraron un comportamiento similar, se incrementaron ligeramente alcanzando entre 0.67 y 0.73 % a los 18 d de evaluación (Figura 23 B). Los resultados sugieren que la baja temperatura mantuvo la AT por más tiempo y que el quitosano no mostró un efecto en el comportamiento de esta variable.

1.5.4.7. Índice de sabor (IS)

El IS inicial de los frutos de ciruela 'Amarilla' fue de 13.3 % (Figura 23 C). En los frutos SQ o CQ a 25 °C el IS se incrementó hasta alcanzar 31.6 y 27 % a los seis días (Figura 23 C). en los frutos almacenados a baja temperatura el IS se incrementó

en baja proporción durante el almacenamiento (Figura 23 C). A lo seis días tenía entre 16 y 17.1 %, a los 12 días entre 13.7 y 17.9, con significativamente mayor IS en los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ, y finalmente a los 18 d el IS estuvo entre 15.1 y 19.2 % (Figura 23 C). Los resultados confirman la tendencia de que el quitosano y la temperatura baja retrasan los procesos de maduración asociados al sabor de la ciruela mexicana 'Amarilla'.

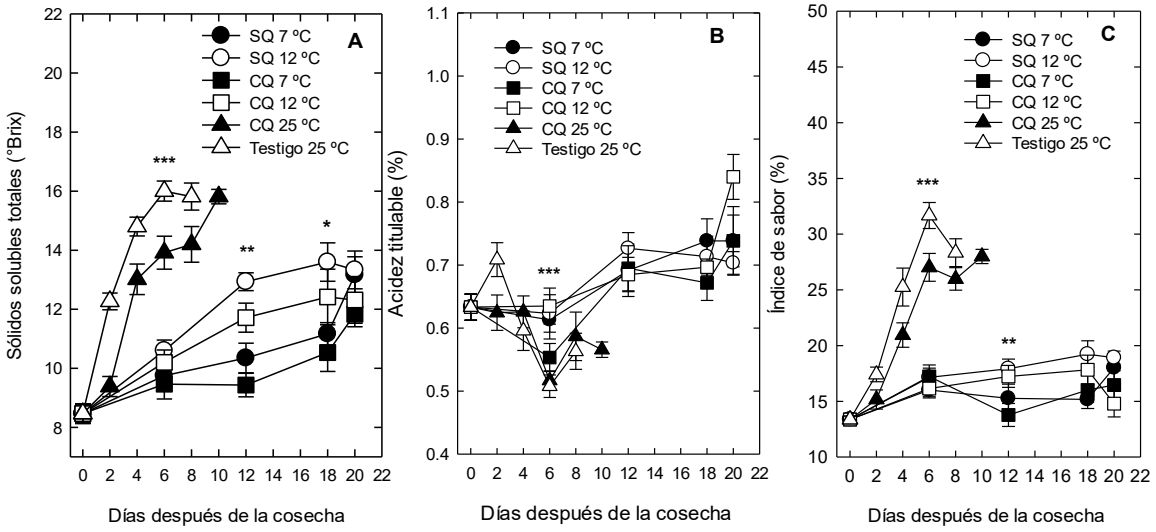

Figura 23. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

1.5.4.8. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se incrementaron de 130.2 mg EAG $100g^{-1}$ a 267.9 y 214.9 mg EAG $100g^{-1}$ en seis días almacenados SQ o CQ a 25 °C, donde la aplicación de quitosano retraso e inhibió parcialmente la síntesis de estas moléculas (Figura 24 A). El almacenamiento a baja temperatura retrasó significativamente la acumulación de estas moléculas; en los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ la máxima

concentración de estas moléculas fue a los 12 y 18 d con 243.2 y 185.4 mg EAG $100g^{-1}$, respectivamente (Figura 24 A). en los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ la máxima acumulación se registró a los 18 d con 262 y 202.5 mg EAG $100g^{-1}$, con menor concentración en los frutos donde se aplicó quitosano (Figura 24 A).

1.5.4.9. Flavonoides totales

Los flavonoides totales se incrementaron significativamente durante la maduración de los frutos almacenados a 25 °C SQ o CQ, de 45.8 mg EQ $100g^{-1}$ a 72.9 y 66.6 mg EQ $100g^{-1}$, donde la aplicación de quitosano retraso en 2 d la acumulación de los flavonoides y disminuyó la concentración en aproximadamente 10 % (Figura 24 B). El almacenamiento a 12 °C retrasó el máximo de acumulación hasta el día 12 y los frutos SQ acumularon más flavonoides que los almacenados CQ (Figura 24 B). similar comportamiento mostró los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ, ya que ambos mostraron la mayor acumulación a los 18 d con entre 54.3 y 57.5 mg EQ $100g^{-1}$ (Figura 24B).

1.5.4.10 Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP

Inicialmente la actividad antioxidante evaluada por el método DPPH fue de 161.2 mg EAA $100g^{-1}$, y se incrementó hasta alcanzar máximos de 418 y 330.2 mg EAA $100g^{-1}$ en los frutos mantenidos a 25 °C SQ o CQ a los seis y ocho días bajo esa condición (Figura 24C). En los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ la actividad DPPH alcanzó un máximo a los 18 y 12 d con 265.4 y 255.9 mg EAA $100g^{-1}$, en los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ, el máximo se alcanzó a los 12 y 18 d con 277.6 y 288.9 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 24C).

En la actividad antioxidante evaluada por el método ABTS, al inicio se determinó 128.4 mg EAAA $100g^{-1}$ y aumento a 336.8 y 325 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días en los frutos almacenados a 25 °C SQ o CQ (Figura 24 D). En los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ se alcanzó su máxima actividad DPPH a los 18 d con 365 mg EAA

$100g^{-1}$ y 280.6 mg EAA $100g^{-1}$; en los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ la máxima actividad ABTS fue a los 18-20 d y 12 d con 345-370 y 316.2 mg EAA $100g^{-1}$, respectivamente (Figura 24 D).

Finalmente, en los frutos almacenados a 25 °C SQ o CQ la actividad antioxidante evaluada por el método FRAP, aumento de 105.4 mg EAA $100g^{-1}$ hasta 253 y 239.6 mg EAA $100g^{-1}$ a los 4 y 8 d (Figura 24 E). Los frutos almacenados a 7 ó 12 °C SQ o CQ mostraron un incremento de la actividad FRAP con menor velocidad, así a los seis días la actividad fue entre 143.1 y 170 mg EAA $100g^{-1}$, a los 12 d entre 180 y 207 mg EAA $100g^{-1}$ y a los 18 d entre 179.1 y 194.9 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 24 E). Los resultados de la actividad antioxidante evaluada por los tres métodos indican que se incrementa durante la maduración y la aplicación de quitosano retraso e inhibió parcialmente el aumento de la actividad antioxidante al combinarse con la baja temperatura.

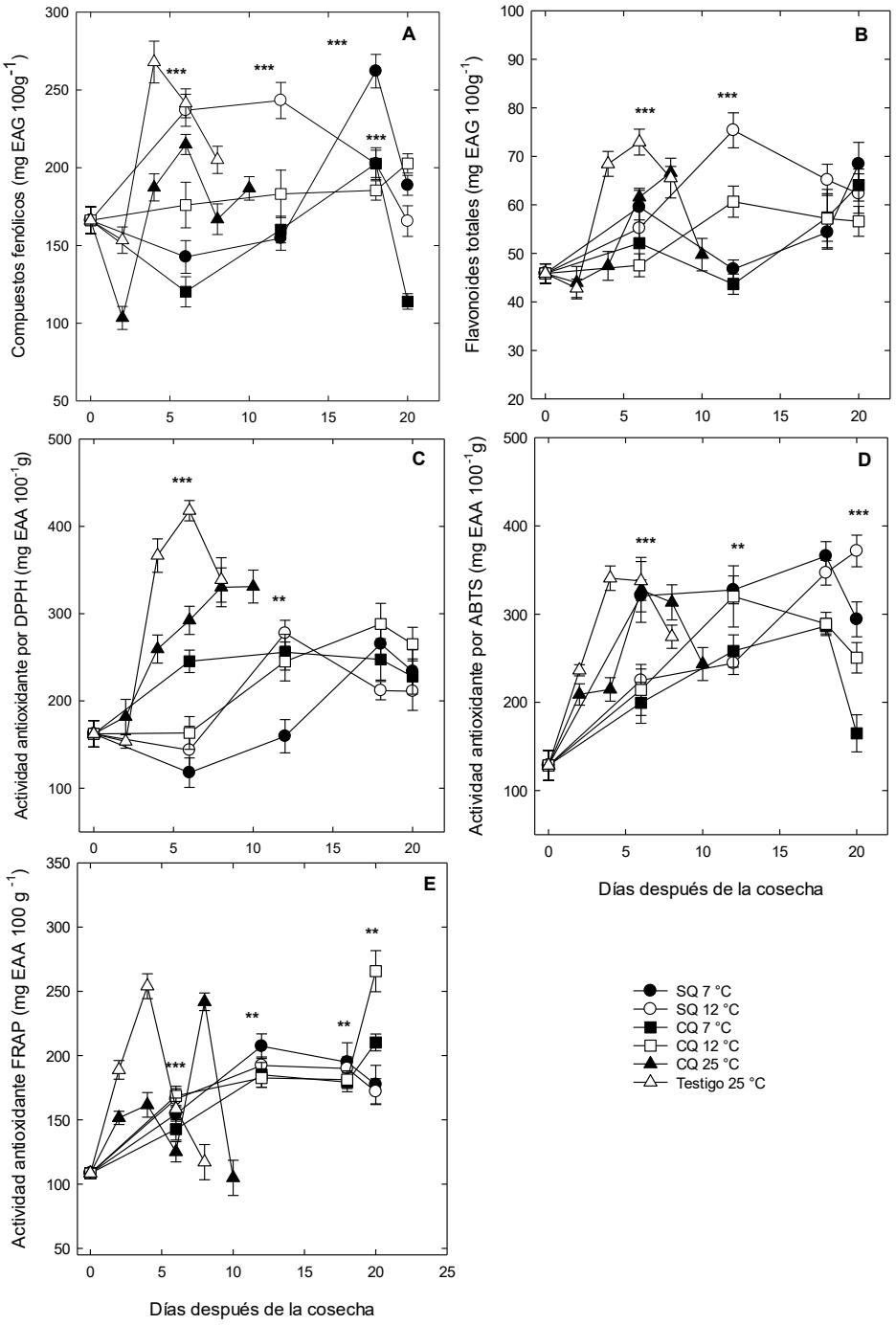

Figura 24. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin recubrimiento de quitosano al 1 % (SQ y CQ) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

1.6 DISCUSIÓN

La respiración y producción de etileno en la ciruela mexicana 'Costeña', 'Morada', 'Roja' y 'Amarilla' mostraron el típico comportamiento de los frutos climatéricos, es decir se incrementó su producción y alcanzó un máximo entre 4-8 y 3-8 d, respectivamente (Figura 1-2, 7-8, 14-15 y 21-22). Coincidente con los reportado por Maldonado et al. (2023) y Cancino et al. (2023). En las variantes de ciruela mexicana 'Morada', 'Roja' y 'Amarilla' se determinó que la aplicación de quitosano al 1 % como un recubrimiento retraso y disminuyó la respiración y producción de etileno en aproximadamente 10 % a temperatura ambiente y a baja temperatura (7 y 12 °C) (Figura 1-2, 7-8, 14-15 y 21-22). Una de las funciones vitales de las cubiertas comestibles es su capacidad de modular la velocidad de respiración (CO_2) en productos frescos, extendiendo su vida útil al retrasar los procesos de maduración (Janith et al., 2026). Se ha reportado que en plátano la aplicación de películas comestibles de quitosano prolonga la aparición del climaterio, lo que sugiere una desaceleración del metabolismo natural del fruto (Anaya et al., 2020). Dai et al. (2025) indican que la aplicación de quitosano como cubierta en frutos afectan la actividad de enzimas clave en la síntesis de etileno o actuando como regulador de receptores de etileno, disminuyendo o debilitando su efecto estimulante en el fruto. Aunado al efecto de la cubierta de quitosano la refrigeración o almacenamiento a baja temperatura disminuye la velocidad de las reacciones químicas y las enzimas relacionadas con la síntesis de etileno, por lo cual es una herramienta tecnológica utilizada para incrementar la vida útil de los productos hortícolas (Banerjee et al., 2022).

El almacenamiento de (*Spondias purpurea* L.*)* entre 8 y 9.5 °C por 8 d son las condiciones óptimas para incrementar su vida útil (Martins et al., 2003., Seijum et al., 2011). Aunque, Duarte y Paull (2015) indican que se puede almacenar por 14 d a 12.5 °C y después transferirlas a temperatura ambiente de 30-32 °C donde su vida poscosecha puede ser de hasta 4 d; almacenamiento debajo de 9 °C causa daños por frío. Aunque se observaron algunos síntomas de daños por frío en algunas de las variantes de ciruela mexicana evaluadas, por ejemplo en 'Costeña', 'Morada' y

‘Amarilla’ los frutos almacenados a 7 °C SQ o CQ por más de 18 d, 6 d y 8-12 d mostraron algunas irregularidades en el desarrollo de color, así como en ‘Morada’ la presencia del “picado” de la epidermis, se determinó que cuando se aplicó quitosano la severidad del daño por frío fue menor y en los frutos almacenados a 12 °C SQ o CQ la presencia del daño por frio fue después de los 24 d, 12 d y 16-18 d, respectivamente con sintomatología similar pero menos severa. En particular, la variante ‘Roja’ no mostró daños por frío bajo ninguna condición evaluada. Estos resultados son importantes para trabajos posteriores donde se evalúen otras temperaturas de almacenamiento.

La pérdida de peso en las variantes de ciruela evaluadas fue entre 16 y 26 % a temperatura ambiente SQ, la aplicación de quitosano en esta condición retrasa y disminuye la pérdida de agua; más evidente es el efecto del quitosano a baja temperatura, donde puede retrasar entre 18 y 20 d alcanzar la pérdida de peso que se tiene a temperatura ambiente (Figura 1E, 9, 16 y 23). La pérdida de peso en poscosecha de las frutas, se atribuye a la pérdida de agua y se asocia a una pérdida de valor del producto cuando se vende por su peso (Salveit, 2016). El almacenamiento a baja temperatura ayuda a disminuir la velocidad de respiración, transpiración y el crecimiento microbiano en frutas y hortalizas (Rajapakshe et al., 2026). Dai et al. (2025) indican que el quitosano puede formar una cubierta continua, densa, elástica y semipermeable en la superficie de los frutos, y esta barrera limita la pérdida de agua dentro del fruto y ayuda a mantener el contenido de agua, lo cual es esencial para mantener el sabor fresco y color del fruto.

La firmeza de las variantes de ciruela mexicana disminuyo significativamente durante la maduración a temperatura ambiente, en aproximadamente 6 d la firmeza disminuyo 52 %, 47.8 %, 39 % y 36 % en las variantes ‘Costeña’, ‘Morada’, ‘Roja’ y ‘Amarilla’, respectivamente (Figura 2 F, 9, 16 y 23); estas diferencias probablemente sean debido a la etapa de maduración en que se cosecho, la firmeza inherente a cada genotipo. La aplicación de quitosano retraso está perdida de firmeza y el almacenamiento favoreció que la perdida de firmeza fuera significativamente menor en todas las variantes. Durante la maduración de frutos, la producción y actividad de

enzimas que degradan la pared celular se incrementan, lo que ocasiona el debilitamiento de la pared celular y en consecuencia el ablandamiento del fruto, las bajas temperaturas disminuyen la actividad de estas enzimas, manteniendo la firmeza e integridad del fruto (Dai et al., 2025., Gidado et al., 2025). La aplicación de quitosano favoreció una menor perdida de firmeza al indirectamente ralentizar los procesos de maduración.

El color de las variantes de ciruela mexicana cambió de un color verde hacia colores rojo, rojo purpura o amarillo, y durante ese proceso la luminosidad disminuyó significativamente la cromaticidad se incrementó y posteriormente disminuyo debido a que las clorofilas se degradan y aparecen los cromoplastos que ocasionan la síntesis de carotenoides y antocianinas y el matiz cambia hacia el color característico rojo, rojo purpura o amarillo (Chen et al., 2026). La aplicación de quitosano y el almacenamiento a bajas temperaturas retrasó en algunas variantes como ‘Costeña’ y ‘Roja’ el desarrollo de los parámetros del color, y en variantes como ‘Morada’ y ‘Amarilla’ la baja temperatura, sobre todo a 7 °C y SQ inhibió la formación o síntesis de pigmentos que ocasionan la coloración de estas frutas. En ciruela mexicana los pigmentos que otorgan el color del fruto son clorofilas, carotenoides y antocianinas (Ferrer et al., 2022). El cambio de color durante la maduración del fruto se puede atribuir a la degradación de clorofilas y síntesis de carotenoides y antocianinas. La refrigeración tiene como principal objetivo retrasar la velocidad de estos cambios al ralentizar las reacciones bioquímicas del metabolismo de los frutos (Watkins, 2017). En la ciruela mexicana la aplicación de quitosano probablemente hizo sinergia con la refrigeración, además favoreció una reducción de oxígeno en la superficie del fruto que condujo a una inhibición de enzimas de la respiración y síntesis de etileno, ocasionando retrasos en el proceso de maduración, incrementando la estabilidad de las paredes celulares que proveen protección a cloroplastos y clorofilas, como se ha reportado en papaya (Singh et al., 2024).

Los sólidos solubles totales y la acidez titulable se incrementaron en las variantes 'Morada' y 'Roja, mientras que en 'Costeña' y 'Amarilla' los sólidos solubles totales se incrementaron y la acidez titulable disminuyó, esto origina que el índice de sabor mostrara valores o tendencia diferente en dependencia de la variante evaluada, pero en general el índice de sabor se incrementó (Figura 4, 11, 18 y 23). A temperatura ambiente y con aplicación de quitosano los cambios se ralentizaron, y aún más cuando se almacenaron a baja temperatura. La refrigeración retrasa la síntesis de azúcares promovida por la hidrólisis del almidón en carbohidratos más simples, que es realizada por la acción de enzimas como amilasas (Morales et al., 2023). Tokatli y Demirdöven (2020) indican que la aplicación de quitosano en frutos de cereza a baja temperatura retrasa la maduración y la acumulación de sólidos solubles totales, aspecto que se observó con mayor evidencia en los frutos a 12 °C en ciruela mexicana. La baja temperatura disminuye la respiración ocasionando que los ácidos orgánicos se acumulen en mayor proporción y se obtenga una mayor AT durante la refrigeración, además de que la cubierta de quitosano hace que exista una disminución de disponibilidad de oxígeno del fruto debido a la formación de una barrera semipermeable favoreciendo la acumulación de ácidos orgánicos (Hesami et al., 2021).

Los compuestos fenólicos se incrementaron en las variantes 'Morada', 'Roja' y 'Costeña' cuando maduraron a temperatura ambiente y SQ, en la variante 'Costeña' la tendencia fue a disminuir (Figura 5A, 12A, 19A y 24A). Los compuestos fenólicos disminuyen durante el crecimiento y maduración de los frutos de ciruela mexicana de estación húmeda (Álvarez et al., 2019), mientras que en las ciruelas de estación seca ocurre un incremento en la primera fase de la maduración debida probablemente a la síntesis de pigmentos y posteriormente disminuye (Cancino et al., 2024). El quitosano y el almacenamiento retrasaron y en algunos casos inhibieron la síntesis de estas moléculas en las variantes de ciruela mexicana evaluadas (Figura 5A, 12A, 19A y 24A), probablemente por efecto de la baja temperatura en la velocidad de las reacciones metabólicas del fruto y por la baja concentración de oxígeno ocasionado por la aplicación de quitosano, ocasiona la baja oxidación de los compuestos fenólicos (Krishan et al., 2025).

Los flavonoides totales disminuyeron en los frutos a temperatura ambiente en las variantes ‘Costeña’ y ‘Morada’ pero se incrementaron en las variantes ‘Roja’ y ‘Amarilla’, el quitosano retraso ese comportamiento y la temperatura aún más retrasó y en algunos casos inhibió la síntesis de estas moléculas (Figura 5B, 12B, 19B y 24B). Aunque una disminución en estos compuestos durante el desarrollo del fruto y en madurez fisiológica, podría parecer al principio deseable debido a una disminución concomitante de la astringencia (Fawole et al., 2013), muchos consumidores suelen estar más interesados en alimentos que contienen moléculas con efectos benéficos para la salud. La ciruela mexicana contiene importantes cantidades de estas moléculas que pueden ser benéficas para la salud humana (Álvarez et al., 2017). En mango el almacenamiento a bajas temperaturas (13 °C) favorece una mayor expresión de genes de las enzimas relacionadas con la síntesis de flavonoides, a esto se atribuye la mayor acumulación de estas moléculas comparada con frutos almacenados a mayores temperaturas (30 °C) (Cong et al., 2025).

Finalmente, la actividad antioxidante evaluada por los métodos DPPH, ABTS y FRAP se incrementaron en las variantes ‘Costeña’, ‘Roja’ y ‘Amarilla’, mientras que en la variante ‘Morada’ las actividades disminuyeron (Figura 5 C-E, 12C-E, 19C-E y 24 C-E). La aplicación de quitosano y el almacenamiento a baja temperatura retraso el aumento de la actividad antioxidante, y en la variante donde disminuyo, los valores fueron muchos menores. En esta última variante ‘Morada’ es donde más evidente se hizo los síntomas de daño por frío, lo que sugiere que la baja tolerancia al frío está asociada con la baja actividad antioxidante. Krishan et al. (2025) indica que las películas comestibles como las que se componen de quitosano tienen un efecto protector, ya que actúan como barrera en el intercambio de CO_2 y O_2, disminuye la oxidación y velocidad de respiración, ayudando a preservar las propiedades benéficas de los frutos

1.7 CONCLUSIÓN

La refrigeración a 7 y 12 °C y aplicación de quitosano en ciruela mexicana retrasó el máximo climaterio, la pérdida de peso, firmeza, acidez titulable, los cambios de color, la acumulación de sólidos solubles totales; la degradación o síntesis de compuestos fenólicos y flavonoides se retrasó, la actividad antioxidante se retrasó significativamente por la adición de quitosano como película comestible. La refrigeración y adición de quitosano en las variantes de ciruela mexicana incremento su vida útil.

1.8 LITERATURA CITADA

Alia, T. I., Pelayo-Zaldívar, C., Álvarez-Vargas, J. E., Palacios-Sosa, A. M., & Pérez-Arias, G. A (2022) Physiological characteristics and postharvest quality in two ecotypes of Sp*ondias purpurea* L. fruit. Acta Horticulturae, 1340, 87-92

Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Chavez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Rivera-Cabrera, F., Nieto-Angel, D., Cruz, L. A., Aguilar-Pérez, L. A., & Pelayo, C, Z (2019) Phenological stages and fruit development in the Mexican plum ecotype 'Cuernavaqueña' (*Spondias purpurea* L.). Fruits, 74, 4, 194-299. https://doi.org/10.17660/th2019/74.4.6

Anaya-Esparza, L. M., Méndez-Zúñiga, S. M., Sayago-Ayerdi, S. G., Sánchez-Burgos, J. A., Villagrán, Z., Montalvo-González, E., & Restrepo, A (2020) Funcionalización de los recubrimientos a base de quitosano con aceites esenciales y su aplicación en la conservación de frutas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 205-218.

Association of Official Analytical Chemists (1984) Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. AOAC.

Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P (1994) Standarisation d´un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal de Phamacie de Belgique*, 49(6), 462-468.

Bautista B. S., Hernández, L. M., Guillén S. D., & Alia, T. I (2006) Influencia del recubrimiento con quitosano y la temperatura de almacenamiento en la calidad postcosecha y niveles de infección en la ciruela mexicana. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 7, 114-121.

Banerjee, S., Haldar, S., Kumar, B.N.S., & Mitra, J (2022) Storage of fruits and vegetables: an overview. In Packaging and storage of fruits and vegetables. Emerging Trends. Alam, T (Ed.). Pp: 157-181Apple Academic Press.

Brand, W.W., Culivier, M.e., & Berset, c (1995) Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, *28*(1), 25-30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Cancino-Labra S., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., & Juárez-López, P (2023) Crecimiento del fruto en tres ecotipos de (*Spondias purpurea* L.) de estación seca. Acta Universitaria, 33, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112086.

Cancino-Labra, S., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G. A., Terán-Erazo, B., & Pelayo-Zaldívar, C (2024) Fruit quality and postharvest physiology in three variants of dry-season *Spondias purpurea* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 30(3), 3-19.

Chizaryfard, A., & Karalaya, E (2022) The value chain dilemma of navigating sustainability transitions: A case study of an upstream incumbent company. Environmental Innovation and Societal Transitions, 45,114-131

Chen, K., Lu, Y., Yang, J., Yang, X., Xu, F. & Ye, J (2026) Molecular orchestration and health implications of fruit pigmentation; from metabolic pathways to nutritional quality. *Planta*, 263, 101.

Dai, L., Wang, X., Zhang, J., & Li, C. (2025). Application of chitosan and its derivatives in postharvest coating preservation of fruits. Foods, 14, 1318.

Duarte, O., & Paull R.E. (2015). Exotic Fruits and Nuts of the New World. CABI.

Fawole O. A., & Opara, U. L (2013) Changes in physical properties, chemical and elemental composition and antioxidant capacity of pomegranate (cv. Ruby) fruit at five maturity stages. *Scientia Horticulturae*, 150, 37-46.

Ferrer, M. M., Ruenes, M. M. del R., Montañez, E. P. I., & Estrada, M. H (2022) Mexican Plum (*Spondias purpurea* L.). En D. Sivakumar, N. Netzel & Y. Sultanbawa (Eds.) Handbook of Phytonutrients in Indigineous Fruits and Vegetables (pp. 405-420) CAB International. https://doi.org/10.1079/9781789248067.0028.

Fortuny, F. N. M., Ferrer M. M., & Ruenes-Morales M. R (2017) Centros de origen, domesticación y diversidad genética de la ciruela mexicana, *Spondias purpurea* (Anacardiacea). *Acta Botánica Mexicana*, 121,7-38

García-González M., Alia-Tejacal, I., Rivera-Cabrera, F., Díaz de León-Sánchez, F., López-Martínez, V. L., Pérez-Flores, J., & Pelayo-Zaldivar, C (2016) Refrigeración de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Cuernavaqueña'. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 2, 27-33.

Gidado, M. J., Nagoor Gunny, A. A., Devi, M., Hussain, M., & Bibi, A (2025) Trends and advances in quality management of horticultural produce by lighting strategies – A comprensive review. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 8184-8222.

Hesami, A., Kavooosi, S., Khademi, R., & Sarkhani, S (2021) Effect of chitosan coating and storage temperature on shelf life and fruit quality of Zizipus mauritania. *International Journal of Fruit Science*, 21, 1, 509-518.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Juan R. Escudero, Guerrero. Clave geoestadística 12039. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/17/17019.pdf (Consultado el 9 de enero 2026).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020) Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Adolfo López Mateos Tepalcingo Morelos. Clave geoestadística 170019. Disponible en:https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/17/17019.pdf (Consultado el 9 de enero 2026).

Janith, B. G. U., Athauda, A. R. S. A., Rusarani, T. M. R., Perera, M. D. A. M., Jayasekara, J. M. C. M., & Kumarihami, H. M. P. C (2026) Properties of edible coatings and films. En N. Kumar, U. P. Ashutosh & A. T. Petroska (Eds.), Trends in Edible Packaging A Sustainable Approaches for Postharvest Management of Fruit and Vegetables. Springer. Kasajima, I. (2019). Measuring plant colors. *Plant Biotechnology,* 3(2): 63-75. 19.0322a.

Kumar, S. Mukherjee, A., & Dutta, J (2020) Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives*. Trends in Food Science & Technology*, 97, 196-209

Krishan, R., Misra, M., Subramanian, J., & Mohanty, A. (2025). Emerging trends and apllication of edible coating as a sustainable solution for postharvest management in stone fruits: a comprehensive review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 24, e70179.

Ladaniya, M (2023) *Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation*. Elsevier-Academic Press.

López, C. B. E., Mondaca-Fernández, I., Gortáres-Moroyoqui, P., Meza-Montenegro, M. M., Balderas-Cortés, J. de J., Ruiz-Alvarado, C., & Rueda-Puente, E. O (2019) Rooting of plant cuttings of Salicornia bigelovii (Torr.) by chitosanasa bioproduct of marine origin. *Terra Latinoamericana,* 37, 361-369

Martins, L.P., Silva, S. de M., Alves, R. E., Filgueiras, H. A. C (2003) Fisiología do dano pelo frio en ciriguela (Spondias purpurea L.). *Revista Brasilerira de Fruticultura*, 25(1): 23-26.

Seijum, K. D., Zucareli, V., Polanco, B. W., Evangelista, R. M., Orika, O. E., Benetoli, S. T. R .(2011) Storage temperature and quality of red mombin fruits (*Spondias purpurea* L.) *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9(3): 20-22.

Maldonado, A. Y. I., Alia-Tejacal, I., Jiménez-Hernández, J., & Núñez-Colín, C. A. (2023). Postharvest quality and physiological changes in five ecotypes of (*Spondias purpurea* L.) harvested at three distinct maturity stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 45, e-607.https://doi.org/1010.1590/0100-29452023607

Monroy M. R., García, F. A., Monroy, O. C., Colín, B. H., & Monroy-Ortiz, R (2020) Ciruela (*Spondias purpurea* L.) en los Huertos Frutícolas Tradicionales de Morelos, México. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos México. 53 p

Morales-Chávez, F., Núñez-Colín, C., Mariscal-Amaro, L., Morales-Vargas, A., Alia-Tejacal, I. Rodea-Montero, E. R., Grijalva-Verdugo, C., Veloz-García, R., & Rodríguez-Núñez, J. R (2023) Chitosan coatings with essential oils against Colletotrichum gloeosporioides (Penz.) Penz. and Sacc. in Annona muricata L. fruits. *Horticulturae,* 9, 908.

Rajapakshe, P., Rathnasinghe, N., Guruge, K., Nilmini, R., Jayasinghe, R., Karunaratne, V., Wijesena, R., &Priyadarshana, G (2026) Strategies to minimize post-harvest waste of fruits and vegetables: current solutions and future perspectives. *Journal of Future Foods*, 6(3), 400-412.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26, 1231-1237.

Ruenes, M. M. del R., Montañez, E. P. I., Ferrer, M. M., Jiménez, O. J. J., Iturbe, R. E. G., & Iturbe, A. J. A. A (2022) *Spondias mombin* L., *Spondias purpurea* L., *Spondias radlkoferi* J.D. Smith. Anacardiaceae. En Casas & J. J. Blancas V. (eds.), (p. 1-17), Ethnobotany of the Mountain Regions of Mexico. Springer

Salveit M. E (2016) Respiratory metabolism. En S. Pareek (ed.), (p. 73-91), Postharvest Ripening Physiology of Crops. CRC Press-Taylor & Francis Group.

SIAP, Servicio de Información Agrícola y Pesquera (2026) Cierre de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agrícola y Pesquera. Ciudad de México. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (enero de 2026).

Singh, H., Kaur, B. J., Kumar, D. K., Shams, R., Mukarram, S.A., & Béla, K. (2024). Effect of chitosan based edible coating in management of postharvest losses in papaya: a comprehensive review. Applied Food Research, 4, 1000546.

Sotelo-Alcántara G. A., Alia-Tejacal, I., Rodríguez-Núñez, J. R., Campos-Rojas, E., Juárez-López, P., & Pérez-Arias, G. A (2022) Postharvest effects of a chitosan-cinnamon essential oil coating on soursop fruits (Annona muricata L.). *Acta Horticulturae*, 1340, 35-40.

Tokatli, K., & Demirdöven, A (2020) Effects of chitosan edible film coatings on the physiological qualities of sweet cherry (Prunus avium L.). *Scientia Horticulturae*, 259, 108656.

Thewes, F. R., Brackmann A., Both V., Anese R. de O., Ludwing V., Wendt, L. M., Berghetti M.R.P., Thewes F.R., Klein B., Wagner R (2021) Respiratory quotient level variation during storage: critical period of low oxygen tolerance, metabolism, and quality of 'Galaxy' apples. *Postharvest Biology and Technology*, 182, 111699.

Watkins, C. B (2017) Postharvest physiology of edible plant tissues. En Damodaran, S. & K. L. Parkin (Eds.). Fennema's Food Chemistry. CRC Press.

CAPÍTULO II

APLICACIÓN DEL ÁCIDO ACETILSALICÍLICO EN CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.) 'AMARILLA'

RESUMEN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es una fruta altamente perecedera por lo que la búsqueda de moléculas antisenescentes en combinación con la refrigeración puede ayudar a aumentar su vida útil. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de ácido acetil salicílico (ASA) en algunas variables físicas, químicas y fisiológicas al aplicar o no esta molécula en condiciones a temperatura ambiente y refrigeración. Frutos de la variante 'Amarilla' cosechados en madurez media fueron madurados a 7, 12 y 25 °C con aplicación de ASA o sin aplicación de ASA, realizando muestreo cada 2 d a temperatura ambiente y cada 6 d en refrigeración. Los resultados indican que la aplicación de AS en dosis de 1.5 mM retrasó la respiración y producción de etileno a temperatura ambiente (25 °C), en etileno además inhibió la intensidad de producción en 18 % y a baja temperatura (7 y 12 °C) entre 40 a 50 %. La aplicación del ASA retraso la maduración a temperatura ambiente, evidenciado por una menor pérdida de peso, retraso en la disminución de la firmeza, la velocidad de cambio de color fue menor, el índice de sabor y el metabolismo de compuestos fenólicos y flavonoides, así como las actividades antioxidantes evaluadas por DPPH, ABTS y FRAP. El almacenamiento a baja temperatura de 7 o 12 °C retrasó la maduración, con mayor evidencia cuando se almacenaron los frutos a 7 °C; el ASA solo mostró un efecto aditivo en la pérdida de peso. Los resultados sugieren que el ASA retraso la maduración de la ciruela mexicana 'Amarilla' a temperatura ambiente, sin embargo, a baja temperatura no se detectó un efecto potenciado.

Palabras clave: Ácido acetilsalicílico, actividad antioxidante, firmeza, compuestos fenólicos.

ABSTRACT

The Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) is a highly perishable fruit; therefore, the search for anti-senescence molecules in combination with refrigeration may help extend its shelf life. The objective of this study was to evaluate the effect of acetylsalicylic acid (ASA) on selected physical, chemical, and physiological variables when applied or not under ambient and refrigerated conditions. Fruits of the 'Amarilla' variant harvested at medium maturity were ripened at 7, 12, and 25 °C with or without ASA application, with sampling every 2 days at ambient temperature and every 6 days under refrigeration. Results indicate that ASA application at a dose of 1.5 mM delayed respiration and ethylene production at ambient temperature (25 °C); in ethylene, it additionally inhibited production intensity by 18%, and at low temperatures (7 and 12 °C) by 40–50%. ASA application delayed ripening at ambient temperature, as evidenced by reduced weight loss, slower firmness decline, lower rate of color change, moderated flavor index, and altered metabolism of phenolic compounds and flavonoids, as well as antioxidant activities measured by DPPH, ABTS, and FRAP. Storage at low temperatures (7 or 12 °C) delayed ripening, with stronger effects observed at 7 °C; ASA only showed an additive effect on weight loss. The results suggest that ASA delayed ripening of Mexican plum 'Amarilla' at ambient temperature; however, at low temperatures no enhanced effect was detected.

Key words: Acetylsalicylic acid, Antioxidant activity, Firmness, Phenolic compounds

2.1 INTRODUCCIÓN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es un frutal que se distribuye en la selva baja caducifolia, desde México hasta Brasil y actualmente se reporta en países de Asía y África (Sollano, 2021), los principales estados productores son Jalisco, Michoacán, Chiapas, Zacatecas y Veracruz (SIAP, 2024). La ciruela es considerada un frutal de alto potencial económico por su bajo costo de producción, además la facilidad de su cultivo en huertos caseros es importante para la promoción de alimentos saludables ya que el consumo en fresco, porque crece en forma espontánea y se adapta a suelos pobres y delgados donde no se establecen otros cultivos, además posee resistencia a la sequía debido a su mecanismo de defoliación (Monserrat *et al*., 2022., Avitia *et al*., 2000).

El fruto de ciruela mexicana en fresco es altamente consumido de manera regional en la época de producción, generalmente de abril a junio las variantes de estación seca y de septiembre a noviembre las de estación húmeda (Álvarez et al., 2019., Cancino et al., 2023). Suastegui et al. (2024) indican que la amplia aceptación por los consumidores se atribuye a su alto contenido de sólidos solubles totales y moderada acidez titulable. Además, el fruto es una fuente importante de minerales, vitaminas, alto contenido de fibra y compuestos antioxidantes, los cuales son liberados durante el proceso digestivo y están disponibles para ser absorbidos por el organismo (Suárez et al., 2017., Villa et al., 2017., Sollano et al., 2021., Ferrer et al., 2022).

Sin embargo, el fruto es altamente perecedero, recientemente Cancino et al. (2024) caracterizo la maduración de tres variantes de estación seca a temperatura ambiente y determino que su apariencia aceptable de comercialización es entre 5 y 8 d, en dependencia de la variante y etapa de cosecha; algunos cambios que ocurren durante la maduración son un incremento de la respiración, producción de etileno, sólidos solubles totales, pérdida de peso acumulada, compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante determinada por los métodos de DPPH y ABTS. Además de disminución de la firmeza, ácidos orgánicos y el ángulo de matiz, sin cambios en la luminosidad y cambios variable en la cromaticidad. Romero et al.

(2021) reportan que en tres variantes de ciruela mexicana hay un incremento de la vitamina C después de la cosecha, mientras en una variante no se observan cambios en esta etapa.

En la ciruela mexicana se reporta que el almacenamiento a baja temperatura entre 8 °C y 9.5 °C por 8 d constituye las condicione ideales para su conservación en postcosecha (Kohatsu et al., 2011., Martins et al., 2003), sin embargo, se reporta también que el almacenamiento a 12.5 °C por 14 d y después de esa condición a 30-32 °C la vida útil es de 4 d, señalando que el almacenamiento a temperaturas menores de 9 °C causa daños por frío (Duarte y Paull, 2015). Recientemente, Sotelo et al. (2026) reporta que almacenando a 7 y 12 °C con aplicación de quitosano y sin quitosano la vida poscosecha se puede extender hasta 18 d, por lo que los síntomas de daño por frío dependen de la etapa de cosecha y susceptibilidad de las variantes.

Actualmente se reconoce que algunas hormonas vegetales mejoran la calidad postcosecha de frutas y hortalizas, entre estas moléculas están el ácido acetilsalicílico, el acetil salicilato y metil salicilato ya que mantienen la calidad del fruto y extienden su vida poscosecha al retrasar la maduración y ablandamiento del fruto, reduciendo su decaimiento y manteniendo el sabor del fruto (Chen et al., 2023). En particular el ácido acetilsalicílico se ha observado que tiene un alto potencial en retrasar la maduración, aumentar la calidad y controlar las perdidas poscosecha de frutas y hortalizas (Soleimani et al., 2016). El principal modo de acción es que estas moléculas ayudan en la estabilización de la membrana, incrementan los sistemas antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, retrasan la desintegración de la pared celular, retrasan la síntesis de etileno o inhiben la actividad de enzimas oxidativas de la membrana celular, entre otros (Barman et al., 2019., Soleimani et al., 2016., Serrano et al., 2016).

En México no se ha evaluado la aplicación del ácido acetilsalicílico en la maduración de las variantes mexicanas de ciruela tanto a temperatura ambiente como a temperatura de almacenamiento en refrigeración. Por lo cual, es importante conocer el comportamiento de la ciruela mexicana con estas tecnologías con la finalidad de incrementar la vida postcosecha de esta fruta.

2.2 OBJETIVO

Evaluar cambios físicos, químicos y fisiológicos de una variante de ciruela mexicana 'Amarilla' a la aplicación de ácido acetilsalicílico a temperatura ambiente y dos temperaturas de refrigeración con la finalidad de proponer tecnologías para este fruto de interés regional. con un retardadores de maduración para incrementar la vida de anaquel.

2.3 HIPÓTESIS

La aplicación de ácido acetilsalicílico retrasará y conservará la vida útil de ciruela mexicana 'Amarilla' por más de 15 días en refrigeración.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Localización, material vegetal y organización experimental

Se colectaron frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Amarilla' provenientes de Tepalcingo, estado de Morelos, México (18°35′42″N 98°50′42″O / 18.595 msnm) (INEGI, 2026). Los frutos se cosecharon en maduración ½ verde (50 % del color de la epidermis amarilla y 50 % verde). Los frutos fueron transportados en cajas de plástico vía terrestre durante 1 h al Laboratorio de Producción Agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Los frutos fueron seleccionados sin magulladuras, daño por insectos o patógenos, se lavaron con una solución clorada al 1 %, posteriormente se secaron a temperatura ambiente y se acondicionaron a temperatura ambiente durante 2 h.

Se formaron grupos de frutos a los cuales se aplicaron los siguientes tratamientos: 1) Frutos sin aplicar ácido acetilsalicílico a 7 º C (SAS 7 º C), 2) Sin ácido acetilsalicílico a 12 º C (SAS 12 º C), 3) Con ácido acetilsalicílico a 7 ºC (CAS 7 ºC), 4) Con ácido acetilsalicílico a 12 º C (CAS 12 ºC) 5) Con ácido acetilsalicílico a 25 °C (CAS 25 °C). Adicionalmente se tuvo un grupo de ciruelas donde no se aplicó ácido acetilsalicílico y se utilizó como tratamiento testigo, almacenados a temperatura ambiente (25 ± 2 °C, HR 60 %). Los frutos en refrigeración se mantuvieron en oscuridad en cámaras de temperatura controlada (OLG, Mod.800-D, CHN) 60 % HR. La unidad experimental fue un fruto, con ocho repeticiones bajo un diseño experimental completamente al azar.

La solución de ácido acetilsalicílico (ASA) se preparó como lo indica Valero et al. (2013) y los tratamientos se realizaron mediante inmersión de los frutos durante 10 minutos en la solución de ácido acetilsalicílico a 1.5 mM con agua destilada, transcurrido este tiempo se dejaron secar los frutos a temperatura ambiente (20 °C, 60 a 65 % HR) y se almacenaron a 7 y 12 °C; 85 % HR.

Se realizaron muestreo diariamente de las variables pérdida de peso acumulada, color de epidermis, producción de etileno y respiración en cada grupo de los frutos. En las frutas almacenadas a temperatura ambiente se realizaron análisis destructivos y en las frutas almacenadas a baja temperatura cada seis días, estas variables fueron la firmeza, sólidos solubles totales, acidez titulable índice de sabor, contenido de compuestos fenólicos, flavonoides totales y actividad antioxidante por los métodos de DPPH, ABTS y FRAP, que a continuación se describen.

2.4.2 VARIABLES A EVALUADAS

2.4.4.2.1 La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

Se cuantificaron mediante un sistema estático (Thewes et al., 2021) que consistió en colocar dos frutos de masa conocida en recipientes de capacidad de 250 mL, cerrados herméticamente durante 2 h. Posteriormente, se tomó 1 mL de gas del

espacio de cabeza a través de la septa de los frascos, para inyectarlo a un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 7890A System GC EUA.), con una columna tipo abierta con empaque de capa porosa de sílica conectada simultáneamente a un detector de ionización de flama (FID) a una temperatura de 170 °C y otro de conductividad térmica (TCD) a 170 °C, como gas acarreador se utilizó N2 (2 mL/min). El inyector y horno del cromatógrafo mantuvieron una temperatura de 150 y 80 °C respectivamente, durante las mediciones. Para la cuantificación se utilizaron estándares de CO2 (460 ppm) y etileno (100 ppm) (Quark INFRA® MX).

2.4.2.2 Pérdida de peso acumulada

Los frutos de ciruela se pesaron en una balanza digital (OHAUS®, EUA). El peso inicial se comparó con el registrado en cada fecha de evaluación que se realizó durante los 20 días de evaluación y se calculó el porcentaje acumulado de pérdida de peso del fruto con la fórmula siguiente (Maldonado et al., 2023):

$$Pérdida\ de\ peso\ (\%) = \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ final}\ x100$$

2.4.2.3 Firmeza de pulpa

Se midió con dos lecturas en la parte ecuatorial del fruto cada 6 d y se utilizó un texturometro (Chatillon®, Mod. MT150L, EUA) con un puntal cónico de 6.5 mm de diámetro y 11 mm de altura, los resultados se expresaron en Newton (N).

2.4.2.3 Color de la epidermis del fruto

El color de la epidermis del fruto se midió con un espectrofotómetro de esfera (X-rite®, Mod. SP64, EUA). El color se determinó marcando tres áreas de forma circular distribuidas por todo el fruto después de aplicar el tratamiento, posteriormente se realizaron las lecturas con el espectrofotómetro en la misma posición. Se registraron los valores de luminosidad (L*), cromaticidad (C*) y matiz (h) (Kasajima, 2019). El color de la epidermis del fruto se determinó diariamente durante el periodo de evaluación.

2.4.2.4. Sólidos solubles totales (SST)

Se determinaron con refractómetro digital (ATAGO-PAL 1®, Japón) cada 6 d, las muestras se determinaron a partir de una gota de jugo de la pulpa de cada fruto, los resultados se reportaron como °Brix (Maldonado et al., 2023).

2.4.2.5 Acidez titulable (AT)

Se obtuvo por medio de la técnica descrita por Ladaniya (2023), a partir de 1 g de pulpa de cada fruto se homogenizó en 10 mL de agua destilada con un Ultraturrax (IKA®, EUA). Posteriormente, el homogenizado se centrifugó y se tomaron 5 mL del sobrenadante para titularse con hidróxido de sodio (NaOH, 0.1 N). Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico, utilizando la formula a continuación descrita:

$$Acidez\ titulable\ (\%) = \frac{A\ x\ B\ x\ C\ x\ D\ x\ 100}{W\ x\ Y\ x\ 1000}$$

Donde, A= Volumen de NaOH utilizado para la titulación, B= Normalidad del NaOH (0.1 N), C= Volumen total del homogenizado (muestra + 10 mL de agua), D= Peso equivalente del ácido cítrico (64), W= Volumen del sobrenadante utilizado para la titulación y Y= Peso de la muestra.

2.4.2.6 Índice de sabor (IS)

Con los valores de sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT) se determinó el índice de sabor, al dividir los SST entre la AT (Maldonado et al., 2023).

2.4.2.7 Compuestos fenólicos

El contenido de compuestos fenólicos se determinó con el reactivo de Folin & Ciocalteu, para lo cual se homogenizo 1 g de pulpa fresca con 10 mL de agua destilada con un Ultra Turrax (IKA®, EUA), el homogenizado se centrifugo a 2200 g

por 5 min y del sobrenadante se tomaron 0.5 mL que se colocaron en un tubo de ensaye de 20 mL y se mezclaron con 2.5 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (1:10 v/v) y después de 1 min y antes de 7 min se adicionó 2 mL de carbonato de sodio a 7.5 % (p/v) y se dejó reposar durante 2 h. Posteriormente se tomaron las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico (EAG) $100g^{-1}$ de peso fresco, para lo cual se construyó una curva de calibración con ácido gálico de 10 a 100 mg L^{-1} (Singleton et al., 1999).

2.4.2.8 Flavonoides totales

Los flavonoides totales se determinaron con la metodología de Arvouet et al. (1994). Se homogeneizó 1 g de pulpa con 10 mL de metanol en un Ultra Turrax (IKA®, EUA), posteriormente se centrifugaron a 2200 g durante 5 min en una centrifuga de mesa (Ortoalresa®, España), y del sobrenadante se tomaron 2 mL que se hicieron reaccionar con 2 mL de una solución de tricloruro de aluminio al 2 % p/v y se dejaron en oscuridad por 15 min, para posteriormente tomar las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 415 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de quercetina (EQ) $100g^{-1}$ para lo cual se construyó una curva de quercetina de 3 a 30 mg L^{-1}.

2.4.2.9. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP

Se utilizó la metodología propuesta por Brand et al. (1995), con mínimas modificaciones, para este método se utilizó el sobrenadante que se obtuvo de la extracción de los compuestos fenólicos, con 0.1 mL y 2.9 mL de una solución de DPPH metanólica $6.1x10^{-5}$ M (Sigma Aldrich, EUA), se dejó la reacción por 30 min en oscuridad y se tomaron las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 517 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1}, se construyó una curva de calibración con ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

Se preparó ABTS (Sigma-Aldrich, EUA) 7 mM y persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) a 2.45 mM y se mezclaron 1:1 v/v y se dejaron en agitación por 16 horas, a partir de esta solución se diluyó con etanol 20 % hasta obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.02 a 734 nm, entonces 3 mL de la solución ABTS se hizo reaccionar con 50 μL del extracto acuoso de cada muestra y después de 15 min se determinó las lecturas, los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1} peso fresco (Re et al. 1999), se construyó una curva de ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}. Se empleó la metodología desarrollada por Benzie y Strain (1996), para esto se preparó el reactivo FRAP (TPTZ, $FeCl_3$ y amortiguador de acetato), donde 1.8 ml del reactivo se mezclaron con 140 mL de agua destilada y 60 mL de la solución de las muestras e incubadas a 37 °C por 30 min. Posteriormente, la absorbancia a 593 nm fue determinada. Los resultados se expresaron en mg equivalente de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1} peso fresco con una curva de calibración de ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

2.4.3 Análisis de datos

Los resultados fueron analizados mediante ANOVA y cuando se detectaron diferencias significativas se realizó comparación de medias por la prueba estadística de Tukey ($P \leq 0.05$). Los análisis se realizaron a los 6, 12 y 18 d de evaluación que es cuando todos los tratamientos coinciden. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SigmaPlot® V.15 (Systat Software Inc., EUA).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

La velocidad de respiración en la ciruela 'Amarilla' utilizada como testigo, es decir sin aplicación de ácido acetilsalicílico a 25 °C mostró el máximo a los 4 d de cosechado y entre 8 y 18 % más intenso que el resto de los tratamientos (Figura 25). Así, los

frutos CAS almacenados a 25 °C mostraron el máximo a los seis días, mientras que los frutos almacenados a 7 o 12 °C SAS y CAS el máximo de respiración ocurrió a los 13-16 d de almacenamiento (Figura 25) Estos resultados sugieren que la aplicación de ácido acetilsalicílico retraso el máximo de producción en dos días a temperatura ambiente y sin detectarse efecto importante de la aplicación del ASA en estas últimas condiciones de temperatura.

Por otra parte, la producción de etileno en los frutos testigo o almacenadas SAS a 25 °C alcanzó su máximo a los cinco días con 232.8 $\mu Lkg^{-1}h^{-1}$ (Figura 26 A). Los frutos CAS almacenados a 25 °C el máximo climatérico se observó a los ocho días y la intensidad del picó disminuyó en 42.4 % con respecto a los frutos testigo (Figura 26 B C). Los frutos almacenados a 7 o 12 °C el máximo climatérico se detectó entre los 11 y 14 días de almacenamiento a baja temperatura, y la intensidad del pico climatérico fue entre 40.3 y 52% menos comparado con los frutos testigo (Figura 26 A B C D). Los resultados sugieren que el almacenamiento a baja temperatura y la aplicación de AS retrasa la producción e intensidad del máximo de etileno.

Sanches y Repolho (2022) indican que la aplicación de ácido acetilsalicílico en aguacate retrasa la velocidad de respiración en dos días comparado con el control, y que el retraso en el pico climatérico se tribuye a que el ácido acetilsalicílico inhibe la síntesis de etileno, ya que afecta la expresión de genes relacionados con este proceso. Similar comportamiento se observó en el presente trabajo.

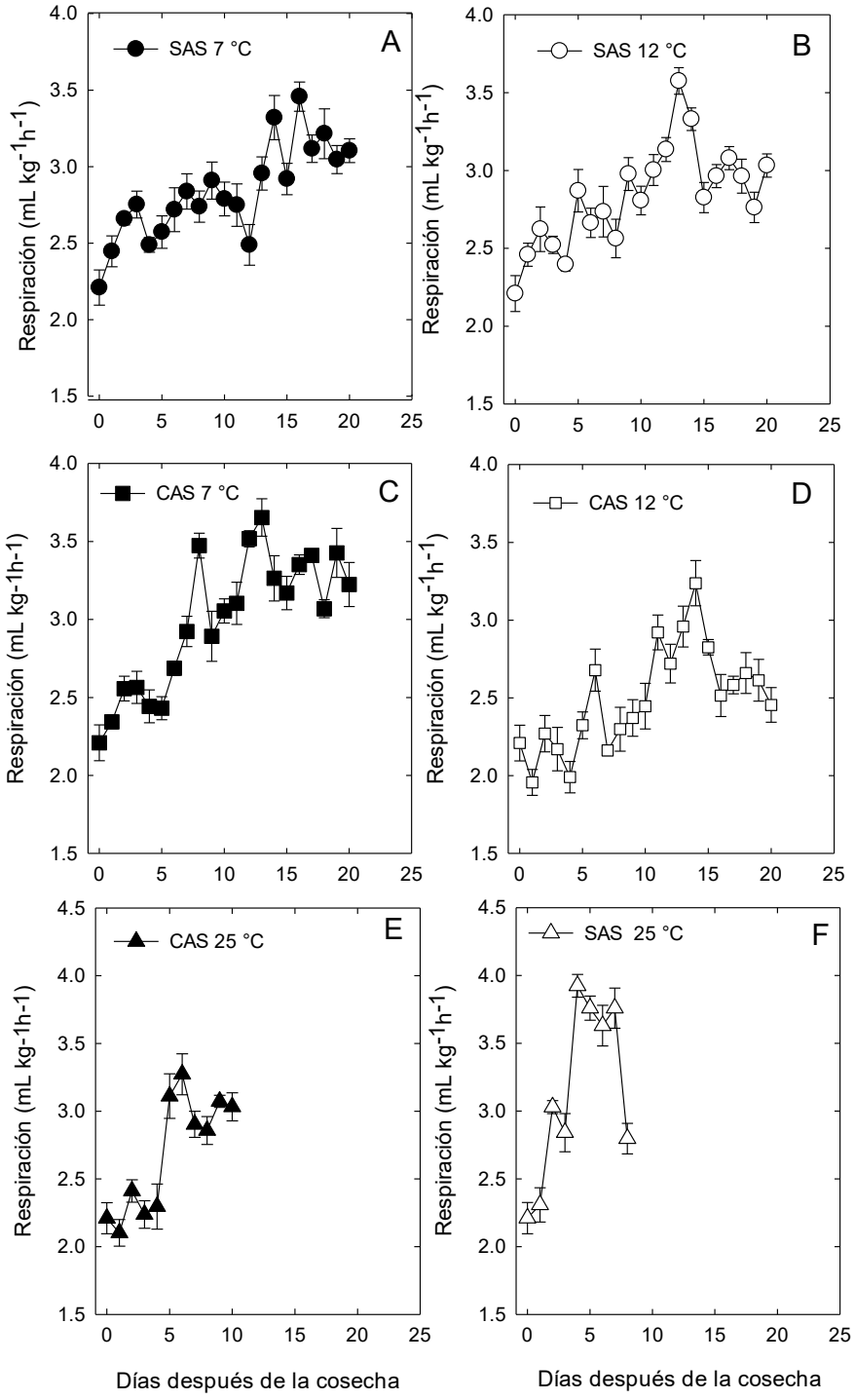

Figura 25. Velocidad de respiración en frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin aplicación de ácido acetilsalicílico (CAS y SAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

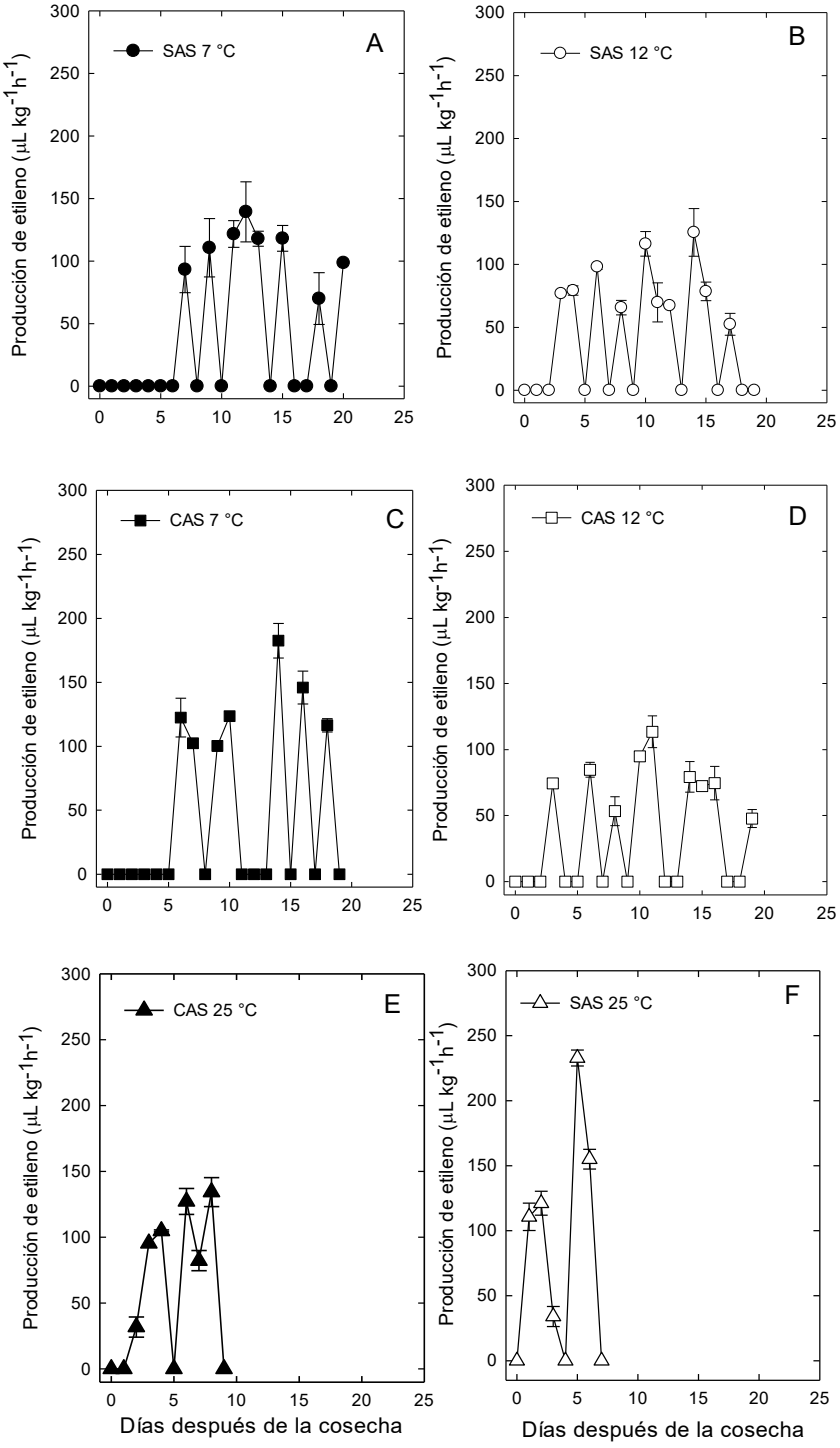

Figura 26. Producción de etileno en frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin aplicación de ácido salicílico (CAS y SAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

2.5.2 Pérdida de peso acumulada

A los seis días de evaluación los frutos SAS a 25 °C tuvieron 9.2 % de pérdida de peso acumulada, superando a los frutos CAS con 8.5 % pero sin detectarse diferencias significativas, en contraste al comparar con los frutos almacenados a 7 o 12 °C CAS o SAS (3.8 % - 4.6 %) se detectaron diferencias con respecto a los frutos testigo (Figura 27 A). Posteriormente, a los 12 y 18 d de evaluación los frutos CAS a 12 °C mostraron significativamente menor pérdida de peso (entre 8.8 y 17.7 %) comparado con los frutos almacenados a 7 °C SAC o SAS y 12 °C SAS (11.5 - 23.1 %) (Figura 27 A). Los resultados sugieren que la aplicación de ASA favoreció una menor pérdida de peso y se observa un efecto potenciado a una temperatura moderada de refrigeración.

El peso del fruto disminuye fisiológicamente debido a la perdida de humedad y la degradación de los sólidos solubles que ocurre durante el almacenamiento, al retrasar la producción de etileno, el ácido salicílico tiene la capacidad de reducir la traspiración y respiración, de la misma manera el ácido acetilsalicílico tiene la capacidad de bloquear las respuestas de las estomas disminuyendo la pérdida de peso (Ali et al., 2022). La disminución de la perdida de firmeza en los frutos por la baja temperatura se atribuye a una reducida actividad de las enzimas degradadoras de la pared celular y a la supresión de la transcripción genética (Li et al., 2025), que, aunque no se ha estudiado en ciruela mexicana es aceptada en otros frutos como jitomate.

2.5.3 Firmeza de pulpa

La firmeza inicial de los frutos de ciruela amarilla fue de 20.7 N y después de seis días disminuyó a 7.5 N en los frutos almacenados a 25 °C SAS y 11.4 N en los frutos almacenados a 25 °C CAS, mientras que los frutos almacenados a 7 ó 12 °C CAS o SAS mostraron entre 17.04 y 20.5 N (Figura 27 B). Posteriormente, a los 12 y 18 d, los frutos almacenados a baja temperatura, 7 ó 12°C CAS o SAS tuvieron una firmeza similar, entre 12.3 y 18.9 N, fue hasta el día 20 que la firmeza disminuyó

hasta entre 5 y 10.6 N (Figura 27 B). Estos resultados sugieren que la baja temperatura retraso significativamente la firmeza de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' y el ASA no mostro un efecto aditivo (Figura 27 B). Se reconoce que el ácido acetilsalicílico retrasa la degradación de la pared celular atribuido a una disminución de la producción de etileno, y esto se refleja en la perdida de firmeza (Ali et al., 2022), a temperatura ambiente se observó este efecto en baja proporción, y a baja temperatura el efecto de la ralentización de las actividades enzimáticas las cuales están asociadas a la actividad de enzimas.

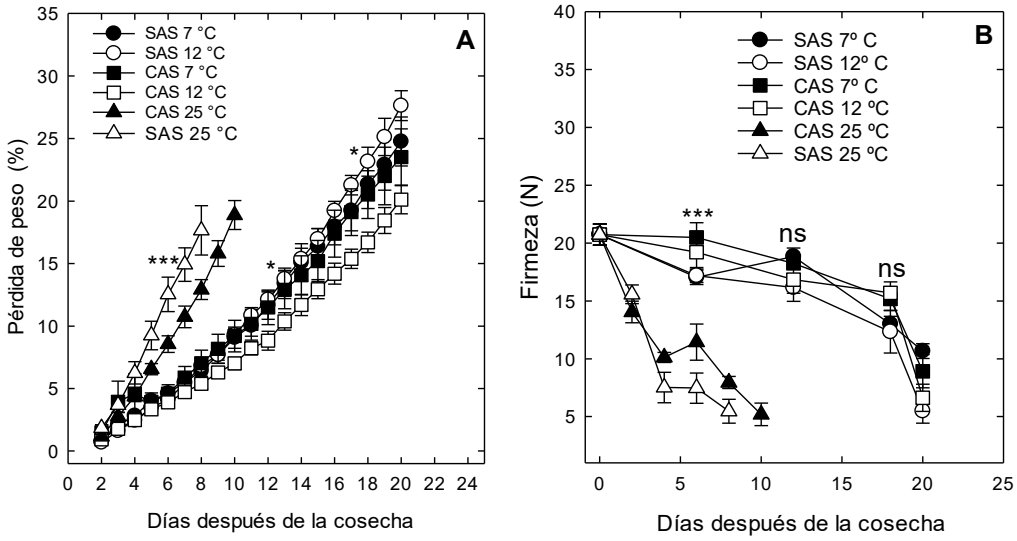

Figura 27. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) de los frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin aplicación de ácido acetilsalicílico (ASA) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

2.5.4. Color de la epidermis del fruto

La ciruela mexicana ‘Amarilla’ mostró cambios de un color amarillo-verdoso con luminosidad y pureza media (L*=56.5, C*=41.1 y h°=94.1), después de dos a tres días la luminosidad y pureza se incrementaron y el color tuvo mayor tendencia al amarillo (L*=67.5, C*=54.4 y h°=79.9) al seguir madurando estos frutos el color alcanzo valores cercanos al naranja, con menor luminosidad y más opacos (L*= 46.2, C*=34.5 y h°=65.8) (Figura 28 A-C). Este comportamiento se ha reportado anteriormente por Romero et al. (2021), Maldonado et al. (2023) y Cancino et al. (2024). Similar comportamiento se observó en los frutos CAS almacenado a 25 °C, aunque se retrasó este comportamiento en dos días, así al sexto día de evaluación los frutos alcanzaron el color amarillo, con la mayor luminosidad y pureza del color (L*= 66.2, C*=54.1 y h°=78.3) (Figura 28 A-C). Chavan y Shakale, (2020) observaron en jitomate que la aplicación de ácido salicílico retraso en dos días el desarrollo del color comparado con frutos donde no se aplicó el ácido acetilsalicílico.

En los frutos almacenados a 7 o 12 °C CAS o SAS el comportamiento fue similar en cuanto a la luminosidad y el matiz, es decir cambiaron hacia el color amarillo y mostraron cambios en la pureza del color, mientras que la luminosidad siempre disminuyo, el cambio de color fue más evidente en los frutos almacenados a 12 °C CAS o SAS, mientras que en los frutos almacenados a 7 °C la cromaticidad no mostró cambios tan pronunciados y el color solo alcanzo el amarillo (Figura 28 A-C). Esto sugiere que existió un efecto de la temperatura en los cambios de color en la ciruela mexicana, con mayor efecto a menor temperatura y que el ASA tiene un efecto de retrasar esos cambios y contener los efectos negativos. El almacenamiento a baja temperatura con refrigeración mecánica retrasa la degradación de las clorofilas y la síntesis de carotenoides en naranja navel (Gao et al., 2019). Este aspecto es probable que ocurrió en ciruela mexicana ‘Amarilla’.

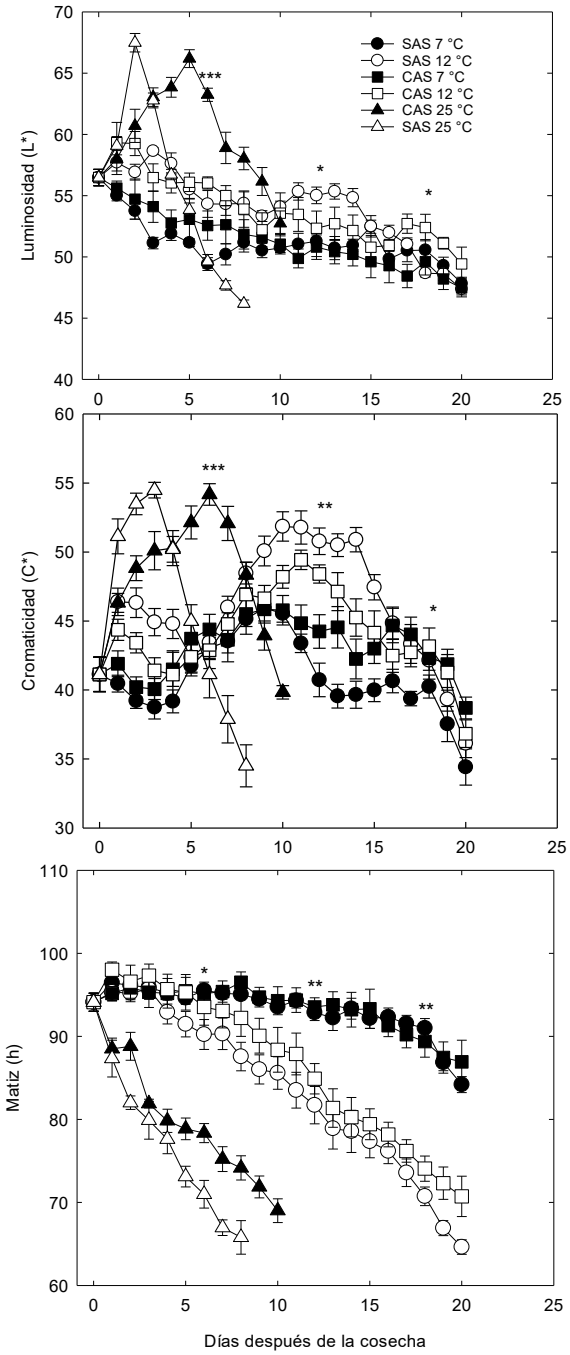

Figura 28. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

2.5.5 Sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de sabor (IS)

Los sólidos solubles totales en los frutos almacenados a 25 °C CAS o SAS aumentaron constantemente de 8.4 °Brix al inicio del experimento hasta 16.0-16.3 °Brix a los seis días, aún en los frutos CAS alcanzaron 17.2 °Brix a los 10 d (Figura 29A). En fresa se ha observado que la aplicación de ácido salicílico, acido metil salicílico y ácido acetilsalicílico no mostraron efecto en la acumulación de los sólidos solubles totales (Gacnik et al., 2021). Los frutos almacenados a 12 °C CAS o SAS mostraron significativamente mayor contenido de SST a los 6, 12 y 18 d con 9.6-10.6, 12.2-12.0 y 13.6-14.6 °Brix, respectivamente (Figura 29 A). Los frutos almacenados a 7 °C CAS o SAS mostraron significativamente menor acumulación de SST a los 6, 12 y 18 d con 9.1-9.7, 9.2-10.3 y 9.8-11.6 °Brix, respectivamente (Figura 29A). Los resultados sugieren que la aplicación de ácido acetilsalicílico no mostró efecto en la acumulación de SST, pero la temperatura si tuvo un efecto significativo (Figura 29 A). Sotelo et al. (2026) determinó que el almacenamiento a baja temperatura (7 y 12 °C) de la variante 'Costeña' retraso la acumulación de SST y esto lo atribuyeron a que la refrigeración retrasa la hidrolisis de almidón en carbohidratos más simples.

La AT disminuyo en los frutos almacenados a 25 °C CAS o SAS de 0.63 % al inicio del experimento a 0.50-0.53 % después de seis días, pero en los frutos almacenados a 25 °C CAS aumento a 0.71-0.75 % en los días posteriores (Figura 29 B). Cancino et al. (2024) reportan que la variante 'Amarilla' mostró pocos cambios durante la maduración, manteniéndose en aproximadamente 0.42 %. En los frutos almacenados a baja temperatura el incremento de la AT se retrasó así se mantuvo entre 0.56-0.63 % a los seis días, entre 0.69 a 0.72 % a los 12 d y entre 0.69-0.77 % a los 18 d y no se detectó efecto por la aplicación de ASA (Figura 29 B). Sugiriendo que la aplicación de ASA a temperatura ambiente retraso el aumento de la AT y la baja temperatura retraso la acumulación de la AT sin efecto aditivo del ASA. Jiang et al. (2022) determinaron que la aplicación de ASA en frutos de arándano a baja temperatura (4 °C) retrasa la degradación de los ácidos orgánicos al disminuir la

expresión de enzimas relacionadas con la modulación de los ácidos orgánicos. En el presente experimento la aplicación de ASA no se observó claramente este efecto, ya que la temperatura fue influyente en el retraso de acumulación de los ácidos orgánicos.

Finalmente, el IS aumento de 13.3 al inicio del experimento a 31.6 % en los frutos almacenados a 25 °C SAS y 27.9 % en los frutos almacenados CAS después de seis días (Figura 20 C). En tanto que los frutos almacenados a 12 °C CAS o SAS se mantuvieron entre 17 y 19.2 % durante 18 d de evaluación (Figura 29 C). Los frutos almacenados a 7 °C CAS o SAS mantuvieron valores entre 14.9 y 15.1 % durante 18 d (Figura 29 C). Esto indica que la temperatura a 12 y 7 °C inhibieron el desarrollo del índice de sabor, sin efecto del ASA. Diversos estudios han indicado que el ASA aumenta la capacidad de almacenamiento sin afectar los atributos de sabor y sus componentes como en limón, piña y toronja; en frutos como kiwi y banano la aplicación de ASA exógeno reduce la actividad de la enzima sacarosa-fosfato sintasa y se retrasa el desdoblamiento de almidón lo que retrasa significativamente los niveles de SST, sin embargo diversos autores indican variabilidad entre especies y dosis de aplicación, por lo cual es necesario realizar más estudios para determinar los tratamientos adecuados (Wang et al., 2022). En ciruela mexicana, se necesitan evaluar en otras variantes y condiciones de almacenamiento para concluir sobre el efecto del ASA debido a la gran variabilidad del material genético.

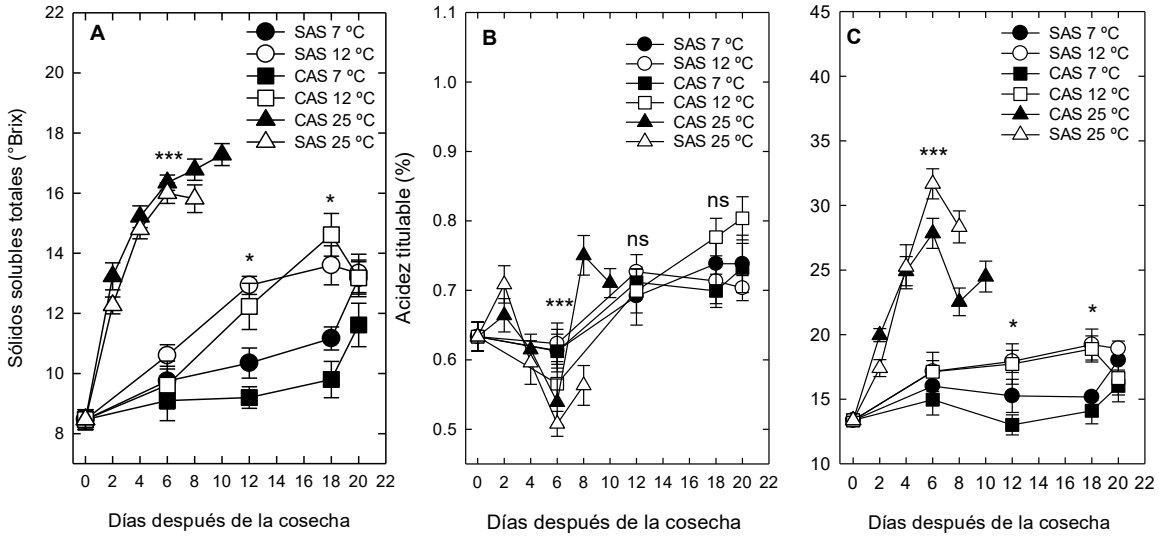

Figura 29. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

2.5.6 Compuestos fenólicos, flavonoides totales y actividad antioxidante: DPPH, ABTS y FRAP

Los compuestos fenólicos se incrementaron de valores iniciales de 162.2 g EAG $100g^{-1}$ hasta 240.1 mg EAG $100g^{-1}$ a los seis días de evaluación en los frutos almacenados SAS, similar tendencia tuvieron los frutos almacenados CAS, pero la máxima acumulación fue a los ocho días con 242 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 30 A). En los frutos almacenados a 12 o 7 °C SAS los compuestos fenólicos se acumularon alcanzando el máximo a los 12 y 18 d con 243.2 y 262.1 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 30 A). En contraste los frutos almacenados a 12 o 7 °C CAS el máximo fue significativamente menor a los 12 y 18 d con 191.4 y 198 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 30 A). Estos resultados sugieren que la aplicación de ASA y almacenamiento a baja temperatura retrasan e inhiben la acumulación de los compuestos fenólicos.

Los flavonoides totales se acumularon durante la maduración de los frutos almacenados a 25 °C SAS o CAS, con la diferencia que en los primeros frutos la acumulación máxima fue a los seis días y en los segundos frutos a los ocho días, con 72.9 y 79.6 mg EQ $100g^{-1}$ (Figura 30 B). La temperatura de refrigeración menor causo una baja acumulación de los flavonoides totales, así los frutos almacenados a 12 °C alcanzaron 75.3 y 74 mg EQ $100g^{-1}$ a los 12 y 18 d de almacenamiento y los frutos almacenados a 7 °C SAS o CAS alcanzaron entre 54.3 y 61.2 mg EQ $100g^{-1}$ a los 18 d de evaluación, sugiriendo que el ASA ayudo a retrasar para alcanzar el máximo de estas moléculas (Figura 30B).

La actividad antioxidante evaluada por el método de DPPH aumento de 162.9 mg EAA $100g^{-1}$ al inicio del experimento hasta 419 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días en los frutos almacenados a 25 °C SAS, mismo comportamiento se observó en los frutos almacenados a 25 °C CAS, pero con un máximo significativamente menor 325.4 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 30B). En los frutos almacenados baja temperatura la actividad DPPH fue significativamente menor, entre 117.7 y 22.3 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días, a los 12 d se incrementó entre 159.5 y 282.2 mg EAA $100g^{-1}$ y a los 18 d estuvo entre 212 y 309 mg EQ $100g^{-1}$ (Figura 30 C). Los frutos almacenados a 7 °C SAS mostraron los valores menores y el mayor retraso en el aumento de la actividad DPPH (Figura 30 C).

En la actividad antioxidante ABTS el comportamiento fue similar a DPPH, ya que los frutos almacenados a 25 °C SAS o CAS la actividad incremento de 123.5 mg EAA $100g^{-1}$ al inicio del experimento a 336 y 341 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis u ocho días (Figura 30 D). Los frutos almacenados a baja temperatura se detectó un comportamiento inverso, ya que cuando se almacenaron a 7 °C la actividad fue significativamente mayor que cuando se almacenaron a 12 °C y no se observó un efecto de la aplicación de ASA (Figura 30 D).

Finalmente, la actividad antioxidante FRAP, se incrementó en los frutos testigo o almacenados a 25 °C SAS de 108.45 mg EAA $100g^{-1}$ a 254 mg EAA $100g^{-1}$ a los cuatro días y posteriormente descendió hasta 117.4 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 30 E). similar comportamiento se observó en los frutos almacenados a 25 °C CAS, donde el máximo fue significativamente menor (196.8 mg EAA $100g^{-1}$) a los ocho días y después disminuyó (Figura 30 E). Los frutos almacenados a 12 o 7 °C CAS o SAS no mostraron diferencias entre ellos, aumentando a 146 -166 mg EAA $100g^{-1}$ a los seis días, entre 184 y 207 mg EAA $100g^{-1}$ a los 12 días y entre 185 y 207 mg EAA $100g^{-1}$ a los 18 d (Figura 30 E).

Durante la maduración de la ciruela ‘Amarilla’ los compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante se incrementan (Cancino et al., 2024). Similar comportamiento se observó en el presente trabajo, la aplicación de ASA retraso y en algunos casos disminuyo la acumulación de algunas moléculas o actividad

antioxidante, esto se atribuye a que el ASA retrasan o disminuyen algunos procesos que afectan el comportamiento de otras moléculas como la respiración o producción de etileno (Wang et al., 2022). Aunado a que la baja temperatura retrasa los procesos y las reacciones metabólicos catalizadas por las enzimas son retrasadas significativamente en ciruela mexicana (Sotelo et al., 2026). Se ha reportado que el ASA favorece un mayor contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante debido a que se activan algunas enzimas relacionadas con el metabolismo de los fenilpropanoides (PAL), sin embargo, en la variante 'Amarilla' de ciruela mexicana el efecto fue más evidente de la temperatura, y en menor grado el ASA, por lo que se necesitan evaluar más variantes y dosis de ASA para corroborar los resultados.

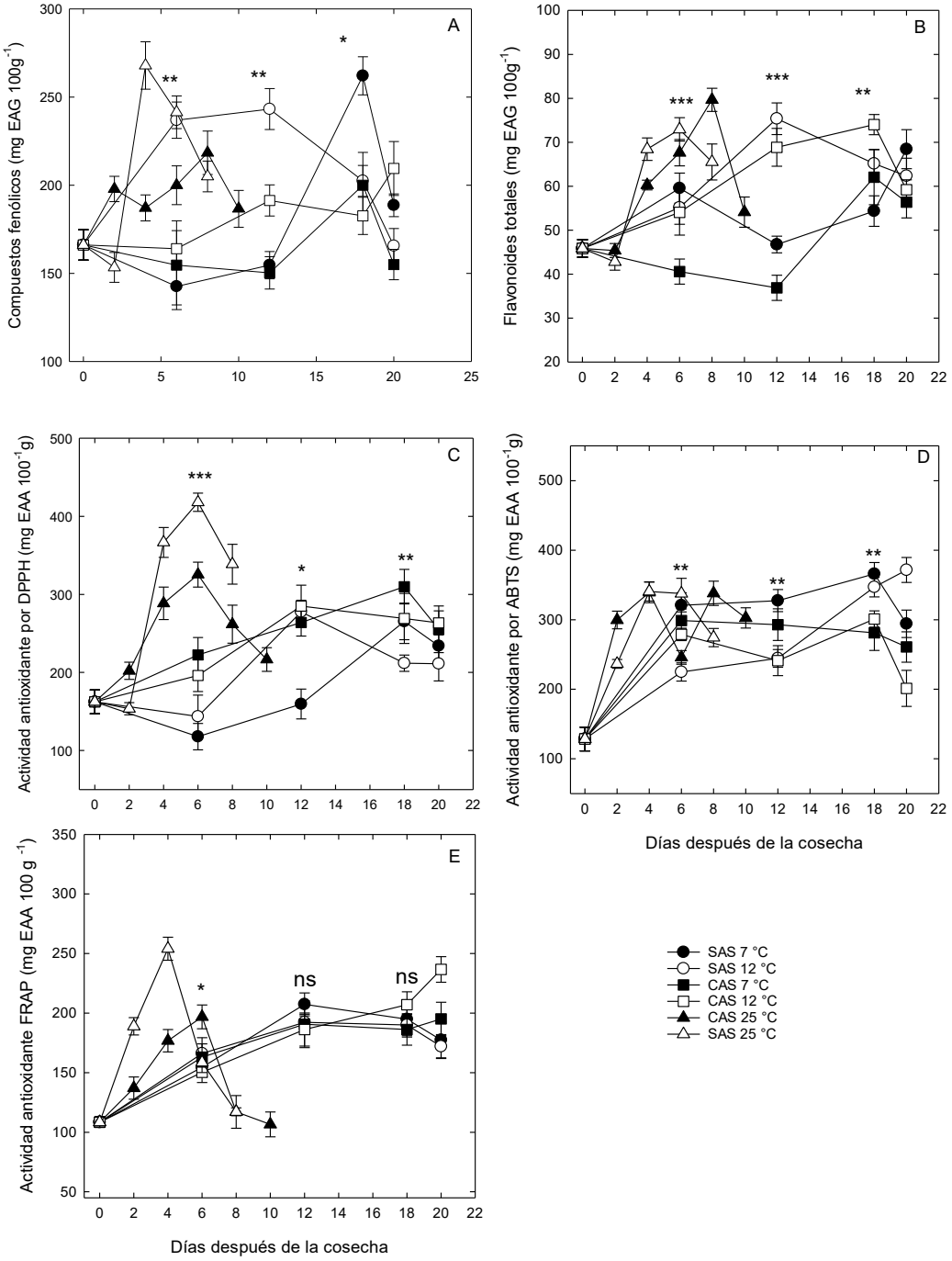

Figura 30. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana ‘Amarilla’ con y sin ácido acetilsalicílico a 1.5 mM (SAS y CAS) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001,(ns) no significativo.

2.6 CONCLUSIÓN

La aplicación de ácido acetilsalicílico retrasa los cambios asociados a la maduración a temperatura ambiente (25 °C). El almacenamiento a baja temperatura (7 o 12 °C) retrasa los cambios físicos, fisiológicos y químicos asociados a la maduración y la aplicación del ácido acetilsalicílico tiene un efecto aditivo. Es necesario evaluar más dosis y en otras variantes el efecto de esta molécula antisenescencia.

2.7. LITERATURA CITADA

Ali, A., Rasool, K., Ganai, N.A., Lone, I.A., Wani, A.H., Malik, K.M., Parveen, S., Anayat, R., & Javeed, K (2022) Postharvest salicylic acid treatment affects weight loss, spoilage and biochemical attributes of Barlett pear fruits. *International Journal of Plant & Soil Science*, *34*(*21*): 343-350.

Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Chavez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Rivera-Cabrera, F., Nieto-Angel, D., Cruz, L. A., Aguilar-Pérez, L. A., & Pelayo, C, Z (2019) Phenological stages and fruit development in the Mexican plum ecotype 'Cuernavaqueña' (*Spondias purpurea* L.). *Fruits,* 74, 4, 194-299. https://doi.org/10.17660/th2019/74.4.6.

Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P (1994) Standarisation d´un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal de Phamacie de Belgique,* 49(6), 462-468.

Avitia, G.E., Castillo, G.A.M., Pimienta, B.E (2003) Ciruela mexicana y otras especies del género (*Spondias purpurea* L.) Universidad Autónoma Chapingo.

Benzie, I.F.F., & Strain, J.J (1996) The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76.

Brand, W.W., Culivier, M.e., & Berset, c (1995) Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT-*Food science and Technology*, 28(1), 25-30. https://doi.org/1010.1016/S0023-6438(95)80008-5

Cancino-Labra, S., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G.A., & Villarreal-Fuentes, J.M (2023 a) Phenophase description in dry-season *Spondias purpurea* L. using a modified version of BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, 318, 112086. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112086.

Cancino-Labra, S., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G.A., Terán-Erazo, B., Pelayo-Zaldívar, C (2024) Fruit quality and postharvest physiology in three variants of dry-season Spondias purpurea L. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 30(3), 3-19.

Chavan, R.F., & Sakhale, B.K (2020) Studies on the effect of exogenous application of salicylic acid on postharvest quality and shelf life of tomato fruit cv. Abhinav. *Food Research*, *4*(*5*): 1444-1450.

Chen, C., Sun, C., Wang, Y., Gong, H., Zhang, A., Yang, Y. Guo, F., Cui, K., Fan, X., Li, X (2023) The preharvest and postharvest of salicylic acid and its derivates on storage of fruit and vegetables: A review. *Scientia Horticulturae*, 312, 111858.

Duarte, O., & Paull, R (2015) Exotic Fruits and Nuts of the New World. CABI.

Ferrer MM, Ruenes-Morales MDR, Montañez EPI, Estrada-Medina H (2022) Mexican Plum (*Spondias purpurea* L.). In: Sivakumar D, Sultanbawa Y, Netzel M, eds. Handbook of Phytonutrients in Indigenous Fruits and Vegetables. CAB International, pp. 405-420.https://doi.org/10.1079/9781789248067.0028

Gacnick, S., Veberic, R., Hudina, M.,Koron, D., & Mikulic-Petkovsek (2021) Salucylate treatment affects fruit quality and also alters the composition of metabolites in strawberries. 7, 400. https://doi.org/10.3390/horticulturae7100400

Gao, Y., Liu, Y., Kan, Ch., Chen, M., & Chen, J (2019) Changes of peel color and fruit quality in navel orange fruits under different storage methods. *Scientia Horticulturae,* 256, 108522.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020) Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Adolfo López Mateos Tepalcingo Morelos. Clave geoestadística 170019. Disponible en:https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/17/17019.pdf (Consultado el 9 de enero 2026).

Jiang, B., Fang, X., Fu, D., Wu, W., Han, Y., Chen, H., Liu, R., & Gao, H (2022) Exogenous salicylic acid regulates organic acids metabolism in postharvest blueberry fruit. *Frontiers in Plant Science*, 13.https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024909

Kasajima, I (2019) Measuring plant colors. Plant Biotechnology, 3(2): 63-75.

Kohatsu, D.S., Zucareli, V., Brambilla, W.P., Evangelista, R.M., Ono, E.O., & da silva, T.R.B (2011) Storage temperature and quality of red mombim fruits (*Spondias purpurea* L.). *Journal of Food, Agriculture & Environment,* 9(3-4), 20-22.

Ladaniya, M (2023) Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation. Elsevier-Academic Press.

Li, X., Huang, H., Zhang, L., & Zhao, L (2025) Effect of Postharvest Storage Temperature and Duration on Tomato Fruit Quality. *Foods*, *14*, 1002. https://doi.org/10.3390/ foods14061002

Maldonado, A. Y. I., Alia-Tejacal, I., Jiménez-Hernández, J., & Núñez-Colín, C. A (2023) Postharvest quality and physiological changes in five ecotypes of Spondias purpurea L. harvested at three distinct maturity stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 45, e-607. DOI:10.1590/0100-29452023607

Martins, L.P., Silva, S. de M., Alves, R.E., & Filgueiras, H.A.C (2003) Fisiologia do dano pelo frio em ciriguela (*Spondias purpurea* L.) *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(1), 23-26.

Romero-Hinojosa, B.M., Arzate-Bolaños, J.J., Alia-Tejacal, I., Alvarez-Vargas, J.E., Pérez-Arias, G.A., Galindo-García, D.V., & Guillén-Sánchez, D (2021) Postcosecha de cuatro ecotipos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) cultivados en Morelos, México. *Current Topics in Agronomic Science*, 1(1), 21-29.

Sanches, G.A., & Repolho, J.R.P (2022) Exogenous salicylic acid preserves the quality and antioxidant metabolism of avocado 'Quintal' cultivar, *Journal of Horticulturae and Postharvest Research*, 5(1): 79-92.

SIAP, Servicio de Información Agrícola y Pesquera (2026). Cierre de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agrícola y Pesquera. Ciudad de México. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (Enero de 2026).

Singleton, V. L., Orthofer, R. & Lamuel, R. M. R (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology,* 299, 152-178.

Soleimani, A.M., Asghari, M., Babalar, M., & Askari, S.M.A (2016) Impact of salicylic acid on postharvest physiology of fruits and vegetables. In Eco-Friendly Technology for Postharvest Produce Quality, Wasim, S. M. (Ed.). Academic Press, pp: 243-268.

Sollano-Mendieta XC, Meza-Márquez GO, Osorio-Revilla G, Téllez-Medina I. D (2021) Effect of in vitro digestion on the antioxidant compounds and antioxidant capacity of 12 plum (*Spondias purpurea* L.) Ecotypes. *Foods*, 10: 1-15. https://doi.org/10.3390/foods10091995

Sollano-Mendieta, X. C., Meza-Márquez, O. G., Osorio-Revilla, G., & Téllez-Medina, D. I (2021) Effect of *in vitro* digestion on the antioxidant compounds and antioxidant capacity of 12 plums (*Spondias purpurea* L.) ecotypes. *Foods*, 10(9).

Sotelo-Alcántara, G.A., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., Juárez-López, P., Pérez-Arias, G.A., Román-Montes de Oca, E., Avonce-Vergara, N., & Villarreal-Fuentes, J.M (2026) La refrigeración y aplicación de recubrimientos de quitosano incrmentan la vida poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Costeña'. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 12: e12e1001.

Suárez VA, Juárez-López P, López-Martínez V, Pérez FLJ, Guillén SD, Alia-Tejacal I (2017) Botany and physiology an-tioxidant activity and physicochemical parameters in 'cuernavaqueña' mexican plump (*Spondias purpurea* L.) at dif-ferent ripening stages. *Revista Brasileira de Fruticultura* 39: 1-10. https://doi.org/10.1590/0100-29452017787

Suastegui-Baylón, L., Maldonado, A.Y.I., Montes, de O. E., Pérez, A. G.A., Jiménez, H. J., Juárez, L. P., Avonce, V.N,., López, M.V., & Alia, T. I (2024) Estudio etnobotánico de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en la región centro del estado de Guerrero. *Botanical Sciences,* 102(4): 1184-1200. https://doi.org/10.17129/botsci.3501

Thewes, F. R., Brackmann A., Both V., Anese R. de O., Ludwing V., Wendt, L. M., Berghetti M.R.P., Thewes F.R., Klein B., Wagner R (2021) Respiratory quotient level variation during storage: critical period of low oxygen tolerance, metabolism, and quality of 'Galaxy' apples. *Postharvest Biology and Technology*, 182, 111699. DOI: 10.1016/i.postarhvbio.2021.111699.

Valero, D., Díaz-Mula, H. M., Zapata, P. J., Castillo, S., Guillén, F., Martínez-Romero, D., & Serrano, M (2011) Postharvest treatments with salicylic acid, acetylsalicylic acid or oxalic acid delayed ripening and enhanced bioactive compounds and antioxidant capacity in sweet cherry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 59(10), 5483–5489.

Villa-Hernández JM, Mendoza-Cardoso G, Mendoza-Espinoza JA, Vela-Hinojosa C, Díaz de León-Sánchez F, Rivera-Ca-brera F, Alia-Tejacal I, Pérez-Flores L.J. (2017) Antioxidant capacity in vitro and in vivo of various ecotypes of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). *Journal of Food Science*, 82: 2576-2582. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13862.

Wang, J., Allan, A. C., Wang, W.-q., & Yin, X.-r (2022) The effects of salicylic acid on quality control of horticultural commodities. New Zeland *Journal of Crop and Horticultural Science*, 50(2-3).

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE HEXANAL DURANTE LA MADURACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.) 'ROJA'

RESUMEN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Roja' es un fruto de consumo regional y altamente perecedero, cuya vida poscosecha no supera los 8 d a temperatura ambiente. Por ello, la evaluación de moléculas antisenescentes resulta esencial para su incorporación en estrategias de conservación. El objetivo de este estudio fue analizar la respuesta de la variante 'Roja' a la aplicación de hexanal bajo condiciones de almacenamiento a temperatura ambiente y refrigeración. Los frutos, cosechados con un 50% de desarrollo del color característico, fueron tratados con hexanal (0.5 mM) y almacenados a 25 °C, 12 °C y 7 °C; se incluyó un grupo control sin aplicación. Los resultados muestran que el hexanal retrasó significativamente la aparición del pico respiratorio y la producción de etileno. Aunque se observó un incremento en la pérdida de peso, la firmeza, el metabolismo de compuestos fenólicos y flavonoides, así como la actividad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP), fueron preservados por más tiempo. El sabor no presentó cambios atribuibles al hexanal, pero sí a la refrigeración, que ralentizó su incremento o degradación durante la maduración. En conclusión, el hexanal aplicado a temperatura ambiente disminuyó la velocidad de procesos fisiológicos y bioquímicos asociados a la maduración de la ciruela mexicana 'Roja', mientras que la refrigeración a baja temperatura potenció este efecto, favoreciendo la conservación de su calidad y aporte nutracéutico.

Palabras clave: Firmeza, respiración, producción de etileno, compuestos fenólicos, flavonoides totales.

ABSTRACT

The Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) 'Roja' is a seasonal regional fruit with a highly perishable nature, as its postharvest life does not exceed 8 d at ambient temperature. Therefore, the evaluation of anti-senescence molecules is essential for their incorporation into conservation strategies. The objective of this study was to analyze the response of the 'Roja' variant to hexanal application under ambient and refrigerated storage conditions. Fruits were harvested at 50% development of their characteristic color and treated with hexanal (0.5 mM), then stored at 25 °C, 12 °C, and 7 °C; untreated fruits served as controls. Results showed that hexanal significantly delayed the onset of the respiratory peak and ethylene production. Although weight loss increased, firmness, the metabolism of phenolic compounds and total flavonoids, as well as antioxidant activity (ABTS, DPPH, and FRAP), were preserved for longer. Flavor was not affected by hexanal application, but refrigeration slowed its increase or degradation during ripening. In conclusion, hexanal at ambient temperature reduced the rate of physiological and biochemical processes associated with the ripening of Mexican plum 'Roja', while low-temperature storage enhanced this effect, favoring the preservation of quality and nutraceutical value.

Key words: Firmness, respiration, ethylene production, phenolic compounds, total flavonoids.

3.1 INTRODUCCIÓN

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es un frutal que se distribuye en la selva baja caducifolia, desde México hasta Brasil y actualmente se reporta en países de Asía y África (Sollano, 2021), los principales estados productores son Jalisco, Michoacán, Chiapas, Zacatecas y Veracruz (SIAP, 2024). La ciruela es considerada un frutal de alto potencial económico por su bajo costo de producción, además la facilidad de su cultivo en huertos caseros es importante para la promoción de alimentos saludables ya que el consumo en fresco, porque crece en forma espontánea y se adapta a suelos pobres y delgados donde no se establecen otros cultivos, además posee resistencia a la sequía debido a su mecanismo de defoliación (Monserrat et al., 2022., Avitia et al., 2000).

El fruto de ciruela mexicana en fresco es altamente consumido de manera regional en la época de producción, generalmente de abril a junio las variantes de estación seca y de septiembre a noviembre las de estación húmeda (Álvarez et al., 2019., Cancino et al., 2023 a). Suastegui et al. (2024) indican que la amplia aceptación por los consumidores se atribuye a su alto contenido de sólidos solubles totales y moderada acidez titulable. Además, el fruto es una fuente importante de minerales, vitaminas, alto contenido de fibra y compuestos antioxidantes, los cuales son liberados durante el proceso digestivo y están disponibles para ser absorbidos por el organismo (Suárez et al., 2017., Villa et al., 2017., Sollano et al., 2021., Ferrer et al., 2022).

Sin embargo, el fruto es altamente perecedero, recientemente Cancino et al. (2024) caracterizo la maduración de tres variantes de estación seca a temperatura ambiente y determino que su apariencia aceptable de comercialización es entre 5 y 8 d, en dependencia de la variante y etapa de cosecha; algunos cambios que ocurren durante la maduración son un incremento de la respiración, producción de etileno, sólidos solubles totales, pérdida de peso acumulada, compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante determinada por los métodos de DPPH y ABTS. Además de disminución de la firmeza, ácidos orgánicos y el ángulo de matiz, sin cambios en la luminosidad y cambios variable en la cromaticidad. Romero et al.

(2021) reportan que en tres variantes de ciruela mexicana hay un incremento de la vitamina C después de la cosecha, mientras en una variante no se observan cambios en esta etapa.

En la ciruela mexicana se reporta que el almacenamiento a baja temperatura entre 8 °C y 9.5 °C por 8 d constituye las condicione ideales para su conservación en postcosecha (Kohatsu et al., 2011., Martins et al., 2003), sin embargo, se reporta también que el almacenamiento a 12.5 °C por 14 d y después de esa condición a 30-32 °C la vida útil es de 4 d, señalando que el almacenamiento a temperaturas menores de 9 °C causa daños por frío (Duarte y Paull, 2015). Recientemente, Sotelo et al. (2026) reporta que almacenando a 7 y 12 °C con aplicación de quitosano y sin quitosano la vida poscosecha se puede extender hasta 18 d, por lo que los síntomas de daño por frío dependen de la etapa de cosecha y susceptibilidad de las variantes. Actualmente se reconocen algunos retardantes de la maduración que pueden junto con la refrigeración retrasar la maduración de las frutas o mantener por más tiempo su calidad, uno de ellos es el hexanal.

El hexanal es un compuesto orgánico ($C_6H_{12}O$), incoloro, líquido, altamente volátil y es un aditivo alimenticio aprobado por la FDA con un estatus de GRAS (generalmente reconocido como seguro) y tiene una dosis letal media (LD50) de 3.7 g kg^{-1} (Azhar et al., 2024). El hexanal se ha utilizado como un inhibidor de la fosfolipasa D, enzima que degrada los fosfolípidos de las membranas celulares durante la maduración y senescencia (Paliyath et al., 2019). Cheema et al. (2018) reportan que se han evaluado formulaciones asperjadas o en inmersión conteniendo hexanal para evaluar la calidad y maduración de cereza, manzana, durazno, guayaba y jitomate, observándose que se mejora la vida poscosecha y la calidad visual del producto sin causar daños en el desarrollo del color o comprometiendo las características de sabor, además de retrasar la maduración y senescencia. También cuando se aplica como vapor se han detectado propiedades antimicrobianas contra patógenos como *Penicillium expansum*, *Botrytis cinerea*, *Alternaria alternata*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Colletotrichum gloeosporioides* y *Monilinia fruticola*. En ciruela mexicana no se ha aplicado esta tecnología.

3.2 OBJETIVO

Determinar el efecto de la aplicación de hexanal en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con la finalidad de conocer los cambios físicos, químicos y fisiológicos durante la maduración a temperatura ambiente y en condiciones de baja temperatura

3.3 HIPÓTESIS

La aplicación de hexanal retrasara los cambios de maduración en frutos de ciruela 'Roja' y almacenados a baja temperatura incrementara aún más su vida útil.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Localización, material vegetal y organización experimental

Se colectaron frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Roja' provenientes de Tepalcingo, estado de Morelos, México (18°35′42″N 98°50′42″O / 18.595 msnm) (INEGI, 2026). Los frutos se cosecharon en maduración ½ verde (50 % del color de la epidermis rojo y 50 % verde). Los frutos fueron transportados en cajas de plástico vía terrestre durante 1 h al Laboratorio de Producción Agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Los frutos fueron seleccionados sin magulladuras, daño por insectos o patógenos, se lavaron con una solución clorada al 1 %, posteriormente se secaron a temperatura ambiente y se acondicionaron a temperatura ambiente durante 2 h.

Se formaron grupos de frutos a los cuales se aplicaron los siguientes tratamientos: 1) Frutos con hexanal a 7 ºC (CHX 7 ºC), 2) Sin hexanal a 12 ºC (SHX 12 ºC), 3) con hexanal a 7 ºC (CHX 7 ºC), 4) Sin hexanal a 12 ºC (CHX 12 ºC) 5) Con hexanal a 25 °C (CHX 25 °C). Adicionalmente se tuvo un grupo de ciruelas donde no se aplicó hexanal y se utilizó como tratamiento testigo, almacenados a temperatura ambiente (25 ± 2 °C, HR 60 %) y un grupo donde se aplicó hexanal almacenados a 25 °C. Los frutos en refrigeración se mantuvieron en oscuridad en cámaras de temperatura

controlada (OLG, Mod.800-D, CHN) 60 % HR. La unidad experimental fue un fruto, con ocho repeticiones bajo un diseño experimental completamente al azar.

El hexanal se preparó de acuerdo con Paliyath et al. (2019), para esto se añadió hexanal 0.5 mM, utilizando etanol puro al 95 % + Hexanal + Tween 20 (Sigma Aldrich) y se diluyó en agua destilada, la inmersión de los frutos fue por 10 min en la solución y transcurrido este tiempo se dejaron secar a temperatura ambiente (20 °C, 60 a 65 % HR) y se almacenaron en cámaras frigoríficas o a la intemperie.
Se realizaron muestreo diariamente de las variables pérdida de peso acumulada, color de epidermis, producción de etileno y respiración en cada grupo de los frutos. En las frutas almacenadas a temperatura ambiente se realizaron análisis destructivos y en las frutas almacenadas a baja temperatura cada seis días, estas variables fueron la firmeza, sólidos solubles totales, acidez titulable índice de sabor, contenido de compuestos fenólicos, flavonoides totales y actividad antioxidante por los métodos de DPPH, ABTS y FRAP, que a continuación se describen.

3.4.2 VARIABLES A EVALUADAS

3.4.2.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

Se cuantificaron mediante un sistema estático (Thewes et al., 2021) que consistió en colocar dos frutos de masa conocida en recipientes de capacidad de 250 mL, cerrados herméticamente durante 2 h. Posteriormente, se tomó 1 mL de gas del espacio de cabeza a través de la septa de los frascos, para inyectarlo a un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 7890A System GC EUA.), con una columna tipo abierta con empaque de capa porosa de sílica conectada simultáneamente a un detector de ionización de flama (FID) a una temperatura de 170 °C y otro de conductividad térmica (TCD) a 170 °C, como gas acarreador se utilizó N2 (2 mL/min). El inyector y horno del cromatógrafo mantuvieron una temperatura de 150 y 80 °C respectivamente, durante las mediciones. Para la

cuantificación se utilizaron estándares de CO2 (460 ppm) y etileno (100 ppm) (Quark INFRA® MX).

3.4.2.2. Pérdida de peso acumulada

Los frutos de ciruela se pesaron en una balanza digital (OHAUS®, EUA). El peso inicial se comparó con el registrado en cada fecha de evaluación que se realizó durante los 20 días de evaluación y se calculó el porcentaje acumulado de pérdida de peso del fruto con la fórmula siguiente (Maldonado et al., 2023):

$$Pérdida\ de\ peso\ (\%) = \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ final}\ x100$$

3.4.2.3. Firmeza de pulpa

Se midió con dos lecturas en la parte ecuatorial del fruto cada 6 d y se utilizó un texturometro (Chatillon®, Mod. MT150L, EUA) con un puntal cónico de 6.5 mm de diámetro y 11 mm de altura, los resultados se expresaron en Newton (N).

3.4.2.3. Color de la epidermis del fruto

El color de la epidermis del fruto se midió con un espectrofotómetro de esfera (X-rite®, Mod. SP64, EUA). El color se determinó marcando tres áreas de forma circular distribuidas por todo el fruto después de aplicar el tratamiento, posteriormente se realizaron las lecturas con el espectrofotómetro en la misma posición. Se registraron los valores de luminosidad (L*), cromaticidad (C*) y matiz (h) (Kasajima, 2019). El color de la epidermis del fruto se determinó diariamente durante el periodo de evaluación.

3.4.2.4 Sólidos solubles totales (SST)

Se determinaron con refractómetro digital (ATAGO-PAL 1®, Japón) cada 6 d, las muestras se determinaron a partir de una gota de jugo de la pulpa de cada fruto, los resultados se reportaron como °Brix (Maldonado et al., 2023).

3.4.2.5 Acidez titulable (AT)

Se obtuvo por medio de la técnica descrita por Ladaniya (2023), a partir de 1 g de pulpa de cada fruto se homogenizó en 10 mL de agua destilada con un Ultraturrax (IKA®, EUA). Posteriormente, el homogenizado se centrifugó y se tomaron 5 mL del sobrenadante para titularse con hidróxido de sodio (NaOH, 0.1 N). Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico, utilizando la formula a continuación descrita:

$$Acidez\ titulable\ (\%) = \frac{A\ x\ B\ x\ C\ x\ D\ x\ 100}{W\ x\ Y\ x\ 1000}$$

Donde, A= Volumen de NaOH utilizado para la titulación, B= Normalidad del NaOH (0.1 N), C= Volumen total del homogenizado (muestra + 10 mL de agua), D= peso equivalente del ácido cítrico (64), W= Volumen del sobrenadante utilizado para la titulación y Y= peso de la muestra.

3.4.2.6. Índice de sabor (IS)

Con los valores de sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT) se determinó el índice de sabor, al dividir los SST entre la AT (Maldonado et al., 2023).

3.4.2.7. Compuestos fenólicos

El contenido de compuestos fenólicos se determinó con el reactivo de Folin & Ciocalteu, para lo cual se homogenizo 1 g de pulpa fresca con 10 mL de agua destilada con un Ultra Turrax (IKA®, EUA), el homogenizado se centrifugo a 2200 g por 5 min y del sobrenadante se tomaron 0.5 mL que se colocaron en un tubo de ensaye de 20 mL y se mezclaron con 2.5 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (1:10 v/v) y después de 1 min y antes de 7 min se adicionó 2 mL de carbonato de sodio a 7.5 % (p/v) y se dejó reposar durante 2 h. Posteriormente se tomaron las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico (EAG) $100g^{-1}$ de peso fresco, para lo cual se construyó una curva de calibración con ácido gálico de 10 a 100 mg L^{-1} (Singleton et al., 1999).

3.4.2.8. Flavonoides totales

Los flavonoides totales se determinaron con la metodología de Arvouet et al. (1994). Se homogeneizó 1 g de pulpa con 10 mL de metanol en un Ultra Turrax (IKA®, EUA), posteriormente se centrifugaron a 2200 g durante 5 min en una centrifuga de mesa (Ortoalresa®, España), y del sobrenadante se tomaron 2 mL que se hicieron reaccionar con 2 mL de una solución de tricloruro de aluminio al 2 % p/v y se dejaron en oscuridad por 15 min, para posteriormente tomar las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 415 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de quercetina (EQ) $100g^{-1}$ para lo cual se construyó una curva de quercetina de 3 a 30 mg L^{-1}.

3.4.2.9. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH, ABTS y FRAP

Se utilizó la metodología propuesta por Brand et al. (1995), con mínimas modificaciones, para este método se utilizó el sobrenadante que se obtuvo de la extracción de los compuestos fenólicos, con 0.1 mL y 2.9 mL de una solución de DPPH metanólica $6.1x10^{-5}$ M (Sigma Aldrich, EUA), se dejó la reacción por 30 min en oscuridad y se tomaron las lecturas en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10s, Thermo, Estados Unidos) a una longitud de onda de 517 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1}, se construyó una curva de calibración con ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

Se preparó ABTS (Sigma-Aldrich, EUA) 7 mM y persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) a 2.45 mM y se mezclaron 1:1 v/v y se dejaron en agitación por 16 horas, a partir de esta solución se diluyó con etanol 20 % hasta obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.02 a 734 nm, entonces 3 mL de la solución ABTS se hizo reaccionar con 50 mL del extracto acuoso de cada muestra y después de 15 min se determinó las lecturas, los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1} peso fresco (Re et al., 1999), se construyó una curva de ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

Se empleó la metodología desarrollada por Benzie y Strain. (1996), para esto se preparó el reactivo FRAP (TPTZ, $FeCl_3$ y amortiguador de acetato), donde 1.8 ml del reactivo se mezclaron con 140 mL de agua destilada y 60 mL de la solución de las muestras e incubadas a 37 °C por 30 min. Posteriormente, la absorbancia a 593 nm fue determinada. Los resultados se expresaron en mg equivalente de ácido ascórbico (EAA) 100 g^{-1} peso fresco con una curva de calibración de ácido ascórbico de 10 a 150 mg L^{-1}.

3.4.3. Análisis de datos

Los resultados fueron analizados mediante ANOVA y cuando se detectaron diferencias significativas se realizó comparación de medias por la prueba estadística

de Tukey ($P \leq 0.05$). Los análisis se realizaron a los 6, 12 y 18 d de evaluación que es cuando todos los tratamientos coinciden. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SigmaPlot® V.15 (Systat Software Inc., EUA).

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. La velocidad de respiración (CO_2) y producción de etileno

El comportamiento de la respiración en la variante 'Roja' fue la de un fruto típicamente climatérico, es decir se incrementó la producción de etileno y respiración después de la cosecha, así los frutos almacenados a 25 °C SHX y CHX mostraron el máximo de respiración después de ocho y nueve días, respectivamente (Figura 31 E-F). Similar comportamiento reporta Cancino et al. (2024). En los frutos almacenados a 7 y 12 °C SHX el máximo climatérico se detectó a los 9 d, mientras que en los frutos almacenados a 7 y 12 °C CHX el pico climatérico de detectó a los 16 d, esto sugiere que la aplicación del hexanal retraso significativamente la velocidad de respiración (Figura 31). Preethi et al. (2018) reportan que el hexanal preserva la integridad de las membranas y de los ácidos grasos, y por ello la aplicación de este aldehído alifático antes del deterioro de la membrana celular, en combinación con el almacenamiento a bajas temperaturas, tiene un efecto significativo en la disminución de la respiración en mango (*Mangifera indica* L.).

En la producción de etileno se observó que los frutos almacenados a 25 °C SHX y CHX el pico climaterio o máxima producción se detectó a los 3 y 8 d, respectivamente (Figura 32 E-F). A baja temperatura la aplicación de hexanal, también retraso la aparición del pico climatérico, así en los frutos almacenados a 7 °C el retrasó fue de cuatro días, mientras que a 12 °C el retraso fue de cinco días (Figura 32 A-D). Estos resultados sugieren un efecto importante del hexanal en la producción de etileno. Yumbia et al. (2021) reporta que la aplicación de hexanal a frutos de banano inhiben la expresión de las enzimas acetil CoA Sintestasa y 1-aminociclopropano-1-

carboxilato-sintasa, que son importantes en la síntesis de etileno y que aunado a la baja temperatura se puede potenciar este efecto de retrasar el máximo climaterio.

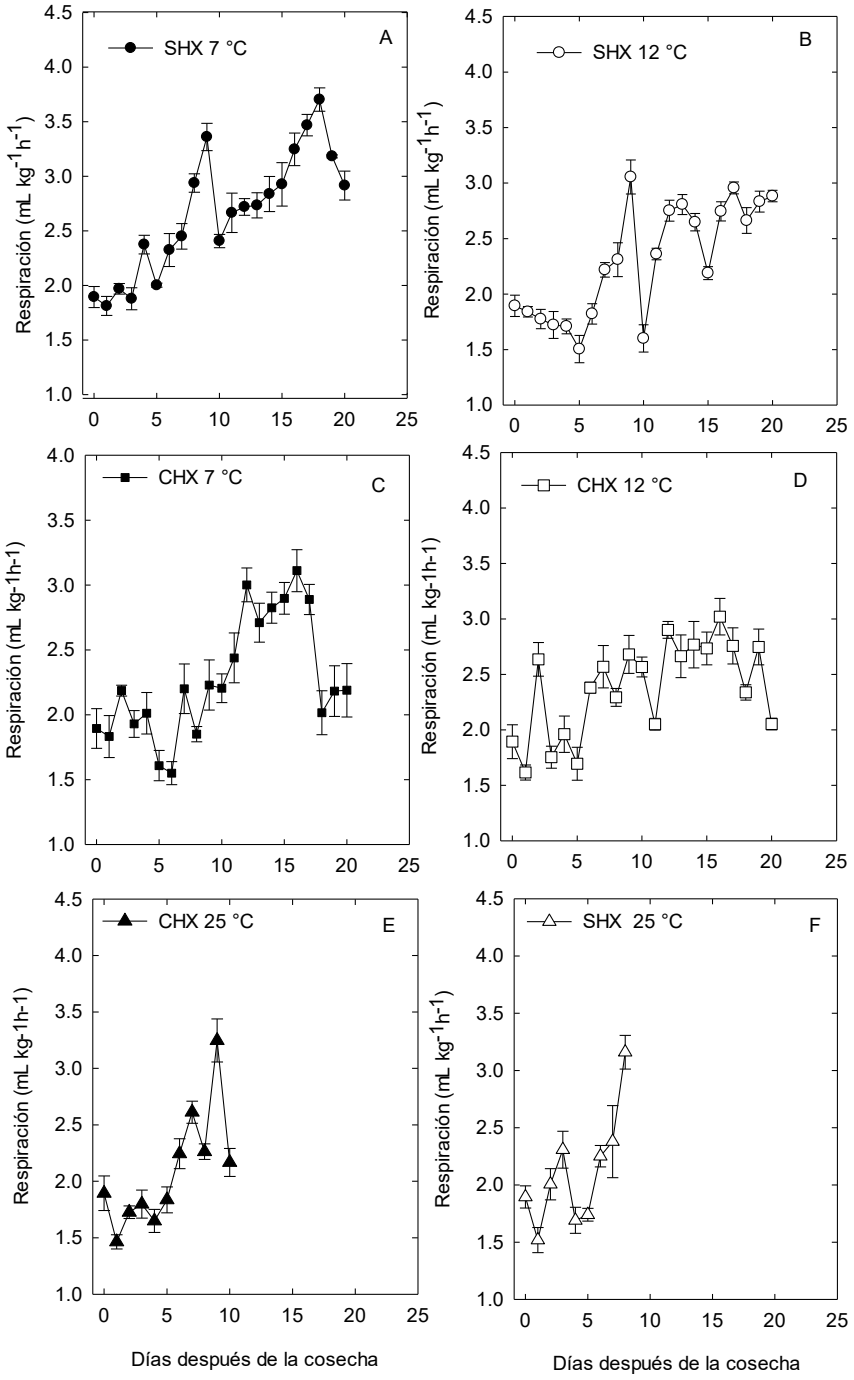

Figura 31. Velocidad de respiración en frutos de ciruela mexicana ‘Roja’ con y sin aplicación de hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

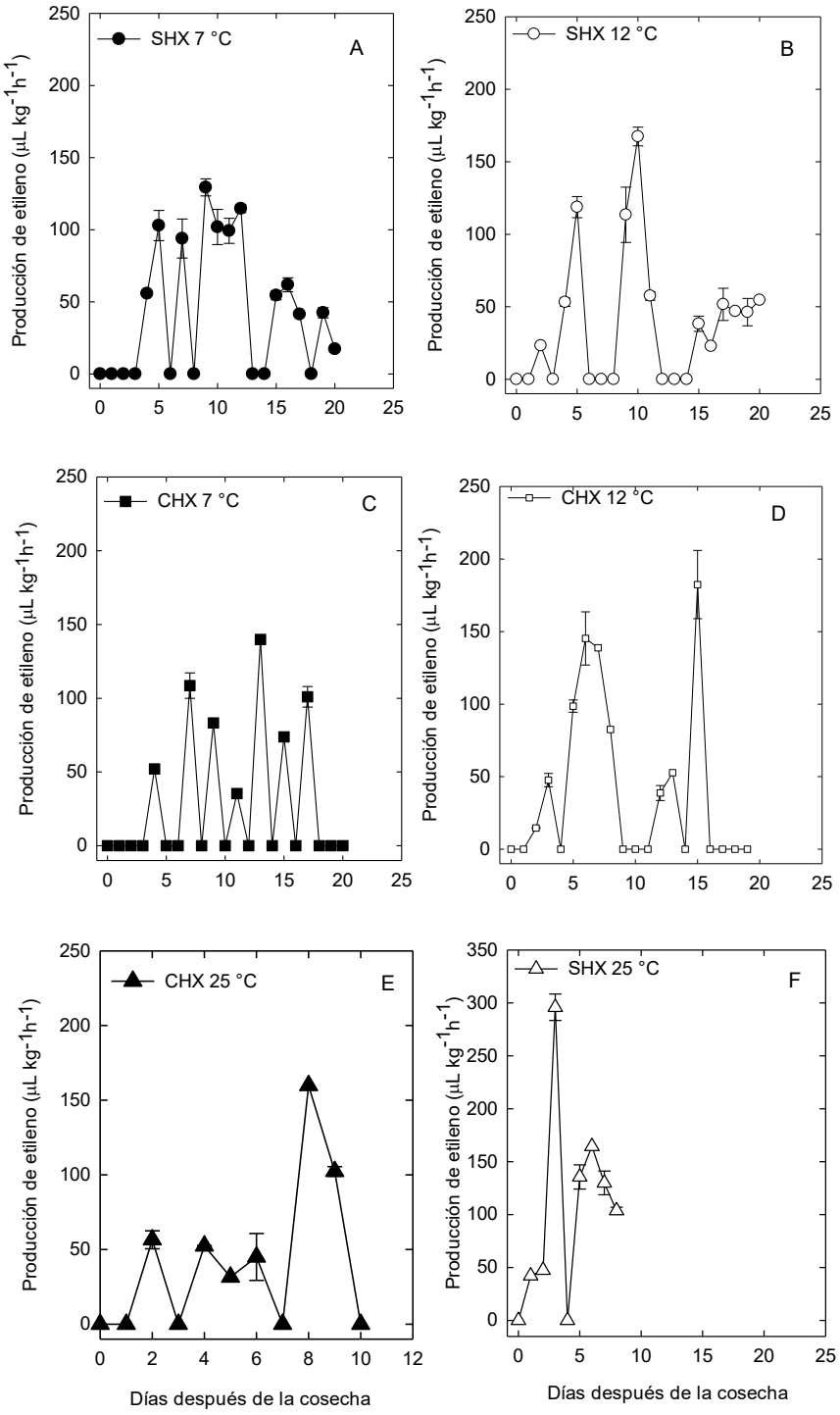

Figura 32. Producción de etileno en frutos de ciruela mexicana ‘Roja’ con y sin aplicación de hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar.

3.5.2. Pérdida de peso acumulada

La pérdida de peso fue significativamente mayor en los frutos almacenados a 25 °C CHX (13.8 %) comparado con los frutos almacenados SHX (11.0 %) a los seis días de evaluación (Figura 33 A). Mientras que en los frutos almacenados a baja temperatura 7 y 12 °C CHX o SHX la pérdida de peso fue similar entre 3.71 y 4.15 % a los seis días, entre 8.4 y 9.8 a los 12 d y entre 16.7 y 18.2 % a los 18 d (Figura 33 A). Lo anterior indica que el hexanal solo mostro un efecto de incrementar la pérdida de peso acumulada a temperatura ambiente y en baja temperatura no se detectó ningún efecto. Diversos autores reportan que la aplicación de hexanal reduce la PP en papaya e higos, hasta en 10 % con respecto a los frutos control y atribuyen este efecto a la disminución de los procesos de respiración y transpiración (Hutchinson et al., 2020). En el presente trabajo no se observó esta disminución de la pérdida de peso a pesar de que la respiración fue menor por efecto del hexanal.

3.5.3 Firmeza de pulpa

La firmeza de los frutos de ciruela mexicana 'Roja' disminuyo de 22.4 N al inicio del experimento a 8.8 N y 11.5 N, en los frutos almacenados a 25 °C SHX y CHX, respectivamente, indicando un efecto significativo de la aplicación del hexanal en el retraso de la perdida de firmeza (Figura 33 B). En los frutos almacenados a baja temperatura, 7 o 12 °C con hexanal mostraron la mayor firmeza a los 6 d con 22.8 N y 21.3 N, comparado con los frutos SHX a la misma temperatura que tuvieron entre 19 y 20 N (Figura 33 B). A los 12 d de evaluación no se detectaron diferencias entre tratamientos de los frutos almacenados a baja temperatura, la firmeza estuvo entre 17.8 y 19.6 N (Figura 33 B). Finalmente, a los 18 d los frutos CHX y almacenados a 7 y 12 °C tuvieron mayor firmeza entre 17.4 y 18.8 N comparados con los frutos almacenados SHX a la misma temperatura quienes mostraron una firmeza entre 16.4 y 16.6 N (Figura 33 B). Öz et al. (2023) reportaron que el hexanal a concentraciones de 0.03 y 0.08 % redujo la pérdida de firmeza de frutos de Persimonio (*Diospyros kaki*) debido a que inhibe la actividad de la enzima fosfolipasa, la cual está

involucrada en la estabilidad de las membranas y en los enlaces de calcio de la pared celular, retrasando con ello la maduración.

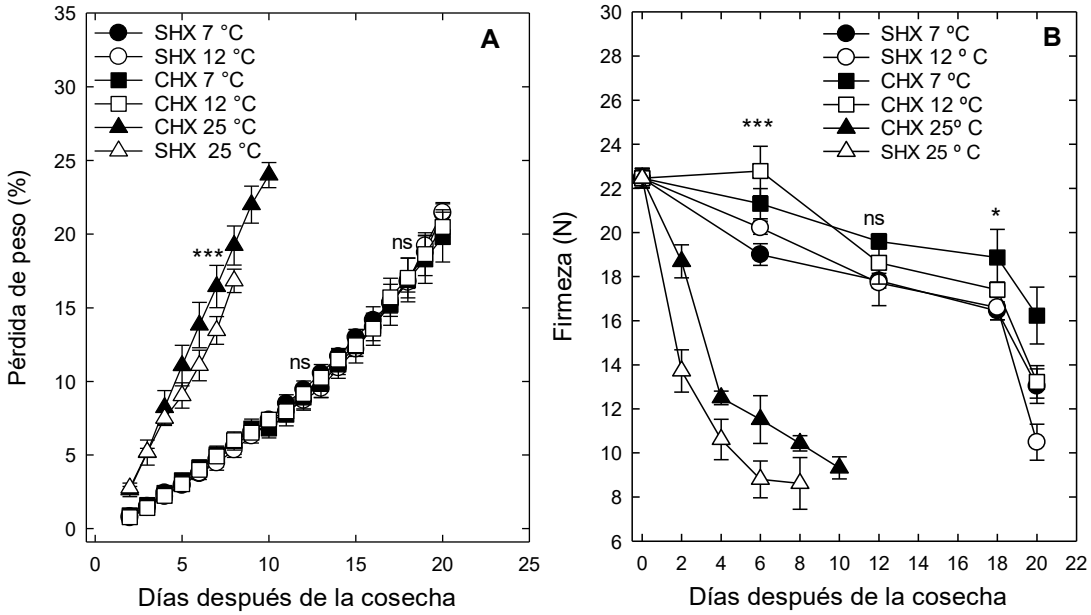

Figura 33. Pérdida de peso (A), Firmeza (B) en frutos de ciruela mexicana 'Roja' con y sin aplicación de hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 001, (***) < 0.001, (ns) no significativo.

3.5.4 Color de la epidermis del fruto

Los frutos de ciruela 'Roja' cambiaron de un color tendiente al verde poco luminoso y opaco (L*= 41.3, C*27.8 y h°=97.9) al inicio del experimento a un color rojo con baja luminosidad y opaco (L*= 30.0, C*= 30* y h°=33.3) en los frutos usados como testigo o almacenados a 25 °C SHX, posteriormente estos frutos fueron con mayor tendencia al rojo purpura, con menor luminosidad y más opacos (L*= 27.6, C*= 26.7 y h°= 28.3 (Figura 34A-C). Es importante indicar el cambio en cromaticidad donde inicialmente se incrementa y posteriormente disminuye, y esto no ocurrió en ninguno de los demás tratamientos evaluados (Figura 34 B). Los frutos almacenados a 25 °C

CHX se observó un comportamiento muy similar a los frutos testigo, aunque con una mayor velocidad de cambio en los parámetros de color, así a los seis días ya alcanzaba un rojo purpura menos luminoso y más opaco (L*= 25.4, C*= 20.4 y h°= 28.7). Sugiriendo un efecto en el desarrollo del color de la ciruela roja.

Los frutos almacenados a baja temperatura mostraron una menor velocidad en los cambios de color donde los frutos almacenados SHX y CHX alcanzaron un color rojo opaco y poco luminoso similar al testigo después de 18-20 d (Figura 34 A-C). En tanto que los frutos almacenados CHX y SHX no alcanzaron valores cercanos al naranja con luminosidad baja y opacos después de 18-20 d (Figura 34 A-C). Estos resultados indican que la baja temperatura retrasó los cambios de color de la ciruela mexicana 'Roja', aunque la aplicación de hexanal en cada temperatura adelanto significativamente el desarrollo del color comparado con los frutos sin aplicación de hexanal (Figura 34 A-C). Silué et al. (2022) indica que la inmersión de frutos de mango en una solución de hexanal retrasa el desarrollo del color, aspecto que en ciruela mexicana no ocurre, al contrario, el hexanal acelera el desarrollo del color. Además, el efecto de la baja temperatura acentuó este retraso del color, como se ha observado en ciruela mexicana 'Costeña' (Sotelo-Alcántara et al., 2026).

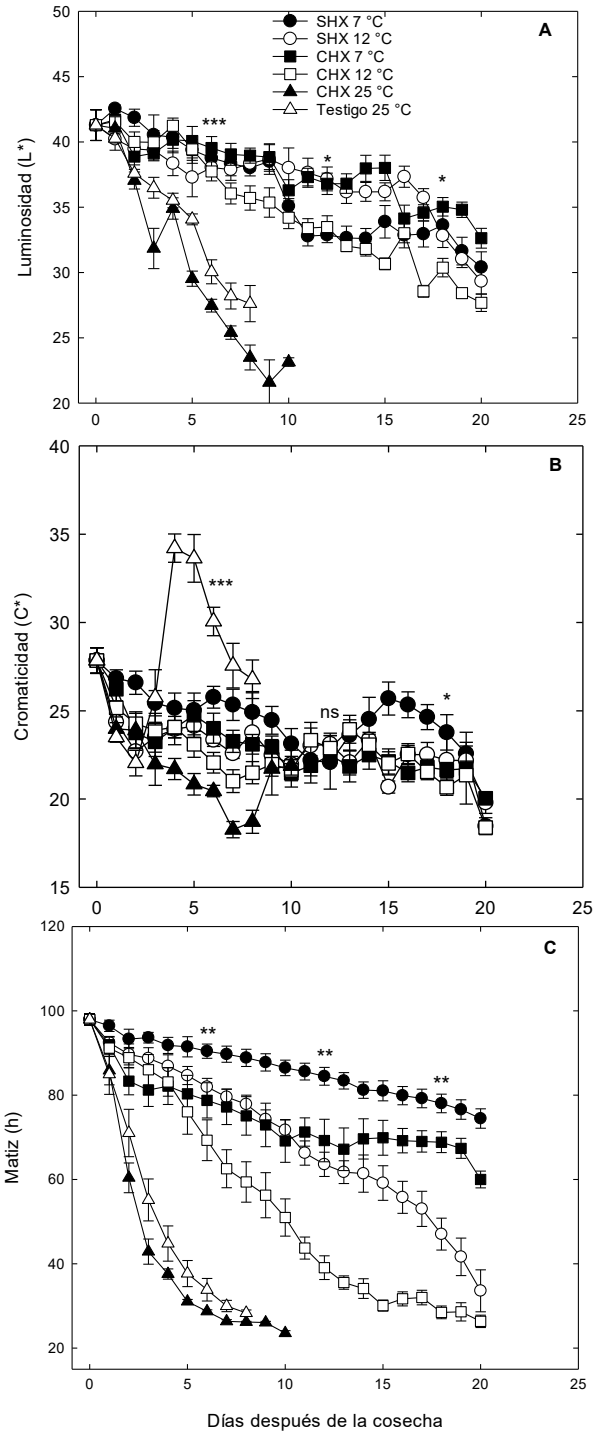

Figura 34. Luminosidad (A), cromaticidad (B) y matiz (C) de los frutos de ciruela mexicana ‘Roja’ con y sin Hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001,(ns) no significativo.

3.5.5. Sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de sabor (IS)

Los SST se incrementaron durante la maduración de los frutos almacenados a 25 °C SHX o CHX, los SST se incrementaron de 7.1 a 14.6–15.2 °Brix después de seis días, y alcanzó hasta entre 16.9 y 17.6 a los 10 d (Figura 35 A). Por otra parte, en los frutos almacenados baja temperatura, se observó que aquellos almacenados a 12 °C SHX o CHX mostraron mayor acumulación de SST, con entre 9.4 y 9.5 °Brix a los seis días, entre 10.9 y 12.1 °Brix a los 12 d y 12.2 y 13.6 °Brix a los 18 d que los frutos almacenados a 7 °C SHX o CHX ya que a los seis días exhibía entre 8.0 y 8.4 °Brix, entre 8.6 y 8.8 a los 12 d y entre 12.2 y 13.6 a los 18 d (figura 35A). Estos resultados sugieren que la temperatura mostró un efecto significativo en la acumulación de los SST (Figura 35 A). Paliyath y Padmanbhan (2019) sugieren que el efecto del hexanal está relacionada con la expresión de genes asociados con el metabolismo de azúcares, además de inhibir directamente a la enzima fosfolipasa D responsable del deterioro de las membranas celulares que tienen lugar en la maduración y senescencia. Sin embargo, faltan más estudios para determinar el modo de acción del hexanal en el metabolismo de los azúcares durante la maduración, ya que en ciruela mexicana ‘roja’ no se observó algún efecto en la acumulación de SST.

La AT en los frutos testigo o almacenados 25 °C SHX se incrementó inicialmente de 1.0 % a 1.2 % a los cuatro días, posteriormente disminuyo a 1.0 % al cuarto día y después aumento gradualmente hasta 1.19 % a los ocho días (Figura 35 B). Los frutos almacenados a 25 tuvieron la AT entre 1.0 y 1.1 % los primero seis días y posteriormente se incrementó hasta 1.2 a los 10 d (Figura 35 B). En los frutos almacenados a 12 °C SHX o CHX la AT se incrementó entre 1.1-1.2 % a los seis días, entre 1.1-1.2 a los 12 y 18 d, en contraste los frutos almacenados a 7 °C SHX o CHX mostraron entre 0.93-0.95 % a los seis días, entre 0.89-0.97 % a los 12 d y entre 1.10 y 1.13 % a los 18 d (Figura 35 B). Estos datos sugieren que la temperatura menor disminuyo la velocidad de incremento de la AT (Figura 35 B). El efecto de

retrasarla acumulación de SST en ciruela mexicana se ha reportado anteriormente (Sotelo et al., 2026).

Finalmente, el IS se incrementó en los frutos almacenados a 25 °C SHC o CHX a los 4 y 6 d alcanzó sus máximos valores con 13.8 y 13.3 % (Figura 35 C). En los frutos almacenados a 7 °C o 12 °C CHX y SHX se tuvo un valor entre 7.7 y 9.0 % a los seis días, enter 9.0 y 9.6 % a los 12 d y entre 8.7 y 10.7 % a los 18 d, donde el valor mayor lo obtuvieron los frutos CHX almacenados a 12 °C (Figura 35 C).

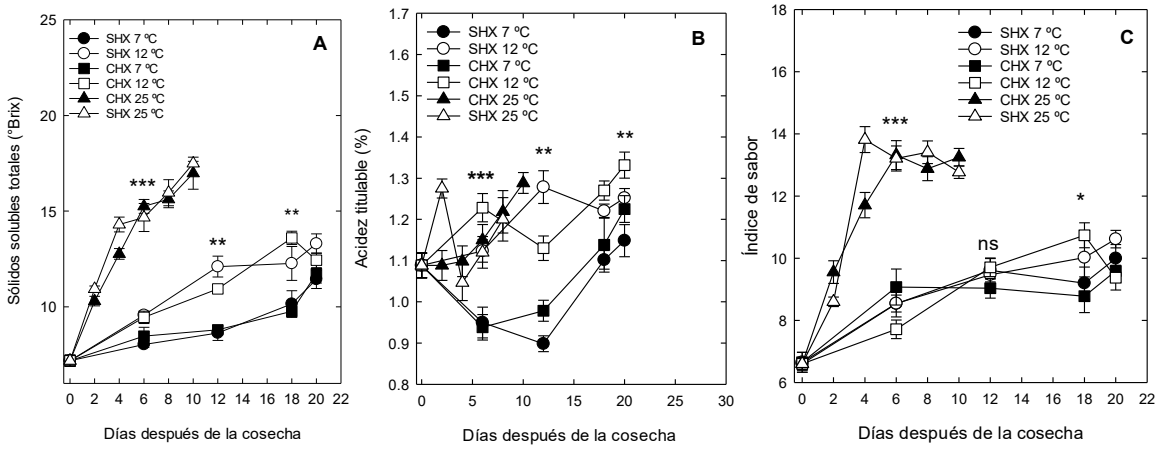

Figura 35. Sólidos solubles totales (SST) (A) Acidez titulable (AT) (B) e índice de sabor (IS) (C) de frutos de ciruela mexicana ‘Roja’ con y sin hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

3.5.6. Compuestos fenólicos, flavonoides totales y actividad antioxidante: DPPH, ABTS y FRAP

Los compuestos fenólicos en los frutos testigo o almacenados a 25 °C SHX aumentaron de 97.6 mg EAG $100g^{-1}$ al inicio de las evaluaciones a 359.2 mg EAG $100g^{-1}$ a los cuatro días para posteriormente disminuir (Figura 36 A). En los frutos almacenados a 25 °C CHX se observó similar comportamiento solo que el máximo

se observó a los ocho días con 310.2 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 36 A). En los frutos almacenados a baja temperatura a los seis d los compuestos fenólicos estuvieron entre 120.8 y 167.5 mg EAG $100g^{-1}$, a excepción de los frutos almacenados a 7 °C CHX que fue significativamente el de menor acumulación con 81.9 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 36 A). A los 12 y 18 d de refrigeración a baja temperatura no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos, aunque si se incrementó el contenido de contenidos fenólicos hasta entre 238.7 y 298.6 mg EAG $100g^{-1}$ (Figura 36 A). Estos resultados indican que el hexanal retrasó la acumulación de los compuestos fenólicos a temperatura ambiente, pero a baja temperatura el almacenamiento retraso la acumulación de los fenoles sin efecto aditivo del hexanal.

Los flavonoides totales en los frutos testigo o almacenados a 25 °C SHX mostraron una acumulación de 61.8 mg EQ $100g^{-1}$ al inicio de las evaluaciones a 77.5 mg EQ $100g^{-1}$ a los 2 d, para posteriormente disminuir constantemente hasta 37.3 a los 8 d (Figura 36 B). Similar comportamiento se observó en los frutos almacenados a 25 °C CHX, solo que el máximo se detectó a los 6 d con 65 mg EQ $100g^{-1}$, para posteriormente disminuir hasta 35.8 mg EQ $100g^{-1}$ a los 8 d (Figura 36 B). En los frutos almacenados a 7 y 12 °C SHX alcanzaron un máximo de concentración a los 6 d, con 71.9 y 85.7 mg EQ $100g^{-1,}$ respectivamente para posteriormente disminuir (Figura 36 B). Mientras que los frutos almacenados a 12 °C CHX el máximo se observó a los 12 d con 80.9 mg EQ $100g^{-1}$, mientras que los frutos almacenados a 7 °C CHX los fenoles se mantuvieron entre 62.5 y 69.2 mg EQ $100g^{-1}$ (Figura 36 B). Esto indica que la aplicación de hexanal retrasó la acumulación de flavonoides totales y la temperatura retraso significativamente la acumulación de estas moléculas.

Los resultados sugieren que el hexanal ralentiza el metabolismo de fenoles y flavonoides durante la maduración de la ciruela mexicana ‘Roja’, esto se atribuye en parte a que el hexanal protege las membranas y modula la biosíntesis de etileno; además que la baja temperatura favorece un metabolismo con menor velocidad (Paliyath et al., 2019).

La actividad antioxidante DPPH mostró un incremento de 254.9 mg EAA $100g^{-1}$ al inicio del experimento a 433.9 mg EAA $100g^{-1}$ a los cuatro días en los frutos testigo, y disminuir posteriormente; mientras que en los frutos almacenados a 25 °C CHX el máximo de la actividad DPPH fue significativamente menor a los ocho días con 357.0 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 36C). En los frutos almacenados a 7 y 12 °C CHX mostraron la mayor actividad a los 12 d, con 292.3 y 354.2 mg EAA $100g^{-1}$, en tanto que los frutos SHX el máximo estuvo a los 18 d con 269.8 y 421.0 mg EQ $100g^{-1}$ (Figura 36C). Esto sugiere que la baja temperatura retraso la actividad antioxidante y el hexanal aceleró los máximos de síntesis de los flavonoides totales (Figura 36C).

La actividad antioxidante por ABTS aumento significativamente en los frutos almacenados a 25 °C SHX de 256.2 mg EAA $100g^{-1}$ a 471.3 mg EAA $100g^{-1}$ a los 6 d, para posteriormente disminuir, misma tendencia se observó con los frutos almacenados a 25 °C CHX, pero con significativamente menor actividad ABTS, 347.3 mg EAA $100g^{-1}$ a los cuatro días (Figura 36 D). El almacenamiento a 12 °C CHX alcanzó el máximo de actividad ABTS a los 12 d con 362.1 y 395.1 mg EAA $100g^{-1}$, mientras que los frutos almacenados a 7 y 12 °C SHX alcanzaron el máximo a los 18 d con 354.2 y 384.3 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 36 D).

Finalmente, la actividad por FRAP se incrementó de 145.1 mg EAA $100g^{-1}$ al inicio del experimento a 247.2 mg EAA $100g^{-1}$ a los 6 d, y en los frutos almacenados a 25 °C CHX el incremento máximo fue a los ocho días con 221 mg EAA $100g^{-1}$ (Figura 36 E). El almacenamiento a baja temperatura retraso el máximo de actividad antioxidante FRAP a los 18 d, con valores entre 200.9 y 246 mg EAA $100g^{-1}$, a excepción de los frutos SHX a 12 °C que alcanzaron su máximo a los 233.2 mg $100g^{-1}$ a los 12 d (Figura 36E). Los resultados de las actividades antioxidante indican que la aplicación de hexanal retrasa el día de aparición del incremento de la actividad antioxidante a temperatura ambiente y es de menor intensidad; en tanto que la baja temperatura retrasa los incrementos de la actividad antioxidante y no se observa un efecto claro del hexanal en esas condiciones. Estas observaciones se han asociado con una mejor preservación de los compuestos fenólicos y flavonoides, además que

se sugiere una menor acumulación de especies reactivas de oxígeno que favorece una mayor capacidad de neutralización en los ensayos químicos, aunado al retraso del pico climatérico el perfil antioxidante se mantiene elevado (Lisjak et al., 2026).

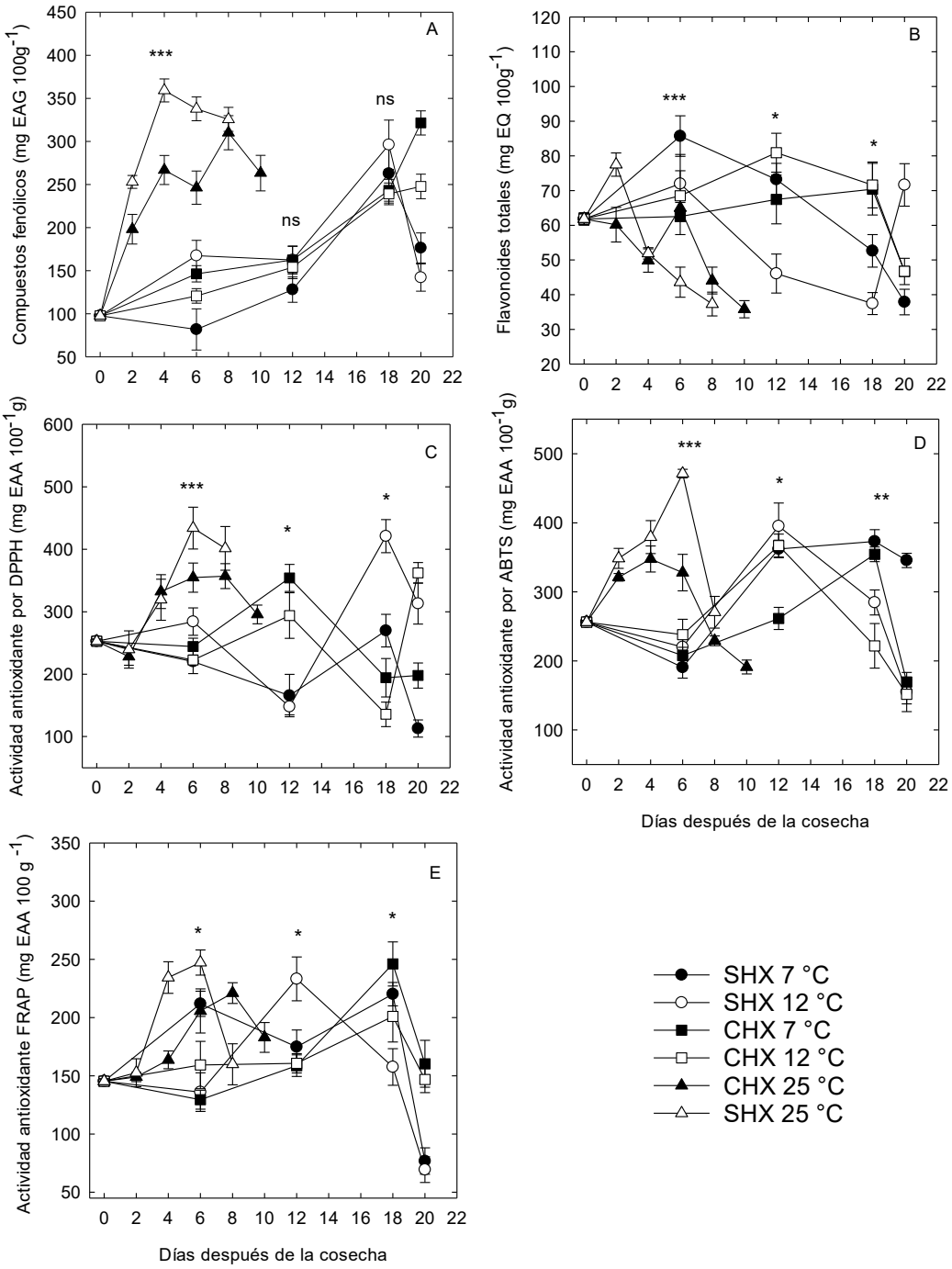

Figura 36. Compuestos fenólicos (A), flavonoides (B), actividad antioxidante por el método DPPH (C), ABTS (D) y FRAP (F) de frutos de ciruela mexicana ‘Roja’ con y

sin hexanal (CHX y SHX) almacenados a 7 y 12 °C. Cada punto representa la media de ocho observaciones y su error estándar. Significancia (*) para <0.05, (**) <0.01, (***) <0.001, (ns) no significativo.

3.6 CONCLUSIÓN

La aplicación de hexanal retrasó la aparición del pico máximo de respiración y etileno, así como la firmeza, el metabolismo de compuestos fenólicos, flavonoides y la actividad antioxidante por DPPH, ABTS y FRAP en los frutos a temperatura ambiente. La refrigeración a baja temperatura acentuó la disminución o retraso de estos procesos. El hexanal no afecto los cambios asociados al sabor, como los sólidos solubles totales, acidez titulable y pérdida de peso, pero si acelero los cambios de color del fruto. El hexanal es necesario evaluarlo en más variantes de ciruela mexicana y otras condiciones de almacenamientos para poder proponerlo en tecnologías de conservación de la especie.

3.7 LITERATURA CITADA

Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Chavez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Rivera-Cabrera, F., Nieto-Angel, D., Cruz, L. A., Aguilar-Pérez, L. A., & Pelayo, C, Z (2019) Phenological stages and fruit development in the Mexican plum ecotype 'Cuernavaqueña' (*Spondias purpurea* L.). *Fruits*, 74, 4, 194-299. https://doi.org/10.17660/th2019/74.4.6

Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P (1994) Standarisation d´un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal de Phamacie de Belgique*, 49(6), 462-468.

Avitia, G.E., Castillo, G.A.M., Pimienta, B.E (2003) Ciruela mexicana y otras especies del género (*Spondias* L.) Universidad Autónoma Chapingo.

Azhar, A.H., Dek, M.S.P., Ramli, N.S., Rukayadi, Y., Maediani, A. and Maidin, N.M., (2024). Hexanal treatment for improving the shelf-life and quality of fruits: a review. *Pertanika Tropical Agricultural Science*, 47(1), pp. 289-305. https://doi.org/10.47836/pjtas.47.1.20

Benzie, I.F.F., & Strain, J.J (1996) The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76.

Brand, W.W., Culivier, M.E., & Berset, c (1995) Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT-*Food science and Technology,* 28(1), 25-30.

Cancino-Labra, S., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G.A., & Villarreal-Fuentes, J.M (2023 a) Phenophase description in dry-season *Spondias purpurea* L. using a modified version of BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, 318, 112086. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112086.

Cancino-Labra, S., Alia-Tejacal, I., Pérez-Arias, G.A., Terán-Erazo, B., Pelayo-Zaldívar, C (2024) Fruit quality and postharvest physiology in three variants of dry-season *Spondias purpurea* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura,* 30(3), 3-19.

Cheema, A., Padmanbhan, P., Amer, A., Parry, M.J., Lim, L.-T., Subramanian, J. and Paliyath, G (2018) Postharvest hexanal vapor treatment delays ripening and enhances shelf life of greenhouse grown sweet bell pepper (*Capsicum annum* L.). *Postharvest Biology and Technology*, 136, pp. 80-89. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.10.006

Duarte, O., & Paull, R (2015) Exotic Fruits and Nuts of the New World. CABI.

Ferrer MM, Ruenes-Morales MDR, Montañez EPI, Estrada-Medina H (2022) Mexican Plum (*Spondias purpurea* L.). In: Sivakumar D, Sultanbawa Y, Netzel M, eds.

Handbook of Phytonutrients in Indigenous Fruits and Vegetables. CAB *International*, pp. 405-420.

Hutchinson, M.J., Ouko, J.R., Yumbya, P.M., Ambuko, J.L., Owino, W.O. and Subramanian, J., (2022) Eficacy of hexanal field spray on the postharvest life and quality of papaya fruit (*Carica papaya* L.) in Kenia. *Advances in Agriculture*, ID 4662734. https://doi.org/10.1155/2022/4262734

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020) Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Adolfo López Mateos Tepalcingo Morelos. Clave geoestadística 170019. Disponible en:https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/17/17019.pdf (Consultado el 9 de enero 2026).

Kasajima, I (2019) Measuring plant colors. *Plant Biotechnology,* 3(2): 63-75. Kohatsu, D.S., Zucareli, V., Brambilla, W.P., Evangelista, R.M., Ono, E.O., & da silva, T.R.B. (2011). Storage temperature and quality of red mombim fruits (*Spondias purpurea* L.). *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9(3-4), 20-22.

Ladaniya, M (2023) Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation. Elsevier-Academic Press.

Lisjak, M., Spoljarevic, M., Ravlic, J., Loncaric, Z., & Galic, L (2026) Phenolic compounds and antioxidant activity: analytical methods and current knowledge- A review. *Methods and protocols*, 9 (2), 60.

Maldonado, A. Y. I., Alia-Tejacal, I., Jiménez-Hernández, J., & Núñez-Colín, C. A. (2023) Postharvest quality and physiological changes in five ecotypes of (*Spondias purpurea* L.) harvested at three distinct maturity stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 45, e-607.https://doi.org/1010.1590/0100-29452023607

Martins, L.P., Silva, S. de M., Alves, R.E., & Filgueiras, H.A.C (2003) Fisiologia do dano pelo frio em ciriguela (*Spondias purpurea* L.) *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(1), 23-26.

Öz, A.T., Eryol, B., Ali, M.A (2023) Postharvest hexanal application delays senescence and mantains quality in persimmon fruit during low-temperature storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), pp. 7653-7663. https://doi.org/10.1002/jsfa.12847

Paliyath, G. and Padmanabhan, P (2019) Preharvest and postharvest technologies based and hexanal: An overview. In: Paliyath, G., Subramanian, J., Lim, L.-T., Subramanian, K.S., Handa, A.K. and Matoo, A. K., eds., *Postharvest Biology and Nanotechnology.*, EUA: Wiley-Blackwell. pp. 89-101.

Paliyath, G. and Padmanabhan, P (2019) Preharvest and postharvest technologies based and hexanal: An overview. In: Paliyath, G., Subramanian, J., Lim, L.-T., Subramanian, K.S., Handa, A.K. and Matoo, A. K., eds., Postharvest Biology and Nanotechnology., EUA: Wiley-Blackwell. pp. 89-101.

Preethi, P., Soorianathasundaram, K., Sadakasthi, A., Subramanian, K.S., Paliyath, G. and Subramanian, J (2018) Influence of hexanal formulation in storage life and postharvest quality of mango fruits. *Journal of Environmental Biology*, 39: 1006-1014. https://jeb.co.in/journal_issues/201811_nov18/paper_10.pdf

Romero-Hinojosa, B.M., Arzate-Bolaños, J.J., Alia-Tejacal, I., Alvarez-Vargas, J.E., Pérez-Arias, G.A., Galindo-García, D.V., & Guillén-Sánchez, D (2021) Postcosecha de cuatro ecotipos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) cultivados en Morelos, México. *Current Topics in Agronomic Science,* 1(1), 21-29.

SIAP, Servicio de Información Agrícola y Pesquera (2026). Cierre de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agrícola y Pesquera. Ciudad de México. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (Enero de 2026).

Silué, Y., Ninjin, C., Cissé, M., Kouamé, K.A., Amani, N.G., Mbéguie-A-Mbéguié, D., Lopez-Lauri, F., & Tano. K (2022) Hexanal application reduces postharvest losses of mango (Mangifera indica L. variety 'Kent') over cold storage whilst maintaining fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, 189, 111930.

Singleton, V. L., Orthofer, R. & Lamuel, R. M. R (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology,* 299, 152-178.

Sollano-Mendieta, X. C., Meza-Márquez, O. G., Osorio-Revilla, G., & Téllez-Medina, D. I (2021) Effect of in vitro digestion on the antioxidant compounds and antioxidant capacity of 12 plums (*Spondias purpurea* L.) ecotypes. Foods, 10(9) 10: 1-15. https://doi.org/10.3390/foods10091995

Sotelo-Alcántara, G.A., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., Juárez-López, P., Pérez-Arias, G.A., Román-Montes de Oca, E., Avonce-Vergara, N., & Villarreal-Fuentes, J.M (2026) La refrigeración y aplicación de recubrimientos de quitosano incrementan la vida poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Costeña'. *Acta Agrícola y Pecuaria,* 12: e12e1001.

Suárez VA, Juárez-López P, López-Martínez V, Pérez FLJ, Guillén SD, Alia-Tejacal I (2017) Botany and physiology an-tioxidant activity and physicochemical parameters in 'cuernavaqueña' mexican plump (*Spondias purpurea* L.) at different ripening stages. Revista Brasileira de Fruticultura 39: 1-10. https://doi.org/10.1590/0100-29452017787

Suastegui-Baylón, L., Maldonado, A.Y.I., Montes, de O. E., Pérez, A. G.A., Jiménez, H. J., Juárez, L. P., Avonce, V. N., López, M.V., & Alia, T. I (2024) Estudio etnobotánico de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en la región centro del estado de Guerrero. *Botanical Sciences*, 102(4): 1184-1200. https://doi.org/10.17129/botsci.3501

Thewes, F. R., Brackmann A., Both V., Anese R. de O., Ludwing V., Wendt, L. M., Berghetti M.R.P., Thewes F.R., Klein B., Wagner R (2021) Respiratory quotient level variation during storage: critical period of low oxygen tolerance, metabolism, and quality of 'Galaxy' apples. Postharvest Biology and Technology, 182, 111699. DOI: 10.1016/i.postarhvbio.2021.111699.

Villa-Hernández JM, Mendoza-Cardoso G, Mendoza-Espinoza JA, Vela-Hinojosa C, Díaz de León-Sánchez F, Rivera-Ca-brera F, Alia-Tejacal I, Pérez-Flores L.J (2017) Antioxidant capacity in vitro and in vivo of various ecotypes of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). *Journal of Food Science*, 82: 2576-2582. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13862.

Yumbya, P., Ambuiko, J., Hutchinson, M., Owino, W., Juma, J., Machuka, E., & Mutuku, J.M (2021) Transcriptome analysis to elucidate hexanal's mode of action in preserving the postharvest shelf life and quality of banana fruits (*Musa acuminata*). *Journal of Agriculture and Food Research*, 3, 100114.

CONCLUSIÓN GENERAL

El almacenamiento en refrigeración a (7 y 12 °C), combinado con la aplicación de tratamientos poscosecha basados en quitosano, ácido acetilsalicílico (ASA) y hexanal, mostraron una estrategia tecnológica y ecológica altamente efectiva para prolongar la vida útil de la ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.). Logrando disminuir el deterioro fisiológico del fruto al retrasar el máximo climatérico, la velocidad de respiración y la producción de etileno, conservando de la firmeza, compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante.

Mientras que el quitosano destaca por actuar como una película protectora que frena la pérdida de peso, el ASA tiene un efecto antisenescencia en refrigeración, y el hexanal trabajó como regulador metabólico a temperatura ambiente, acelerando el cambio de color sin alterar el sabor. En general, estos resultados mostraron alternativas para el manejo poscosecha en futuras investigaciones enfocadas en evaluar un mayor rango de dosis y el comportamiento de ciruela mexicana.

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Encargado de Despacho de la Dirección
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo su dirección y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. IRAN ALIA TEJACAL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

IRAN ALIA TEJACAL | Fecha:2026-10-27 20:14:28 | FIRMANTE

di7yEQJCqEn9EWo8Y56CzxbEnY092XmF/PmfO/wgI4JoeCW59/i0Wp/H4X3fYgyDcmiyYTpxxJbLqQ2o2C21MGr6TORBoTVzzxuD2Z9/O7SwOA1ht3WwApoXcI21KeTyE2DEq/c071GM7wQibrOlmLFIorAy+MkUcqRvlXABKqB9rxpgfMnub1ZiuwL5cQgVysOkhAY5+BvWTyA3F3J1pF+n8+vw9o82AgMJmNNOJYyB20E23HwywaHC+iR6G0NEhgNfhr0bhzW7FZGxjlo9JJz/3dtIBrjTl4mVry2vhHyo2PP8AUwh+oXRWOducaM6pNL7ZLzo935vLgdQIeqv0w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

WiVGb2q7r

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/uaaHswY5YVcbrYn3x7C3HEP3dZfhsWEM

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Encargado de Despacho de la Dirección
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. IRAN ALIA TEJACAL** y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JUAN MANUEL VILLARREAL FUENTES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

JUAN MANUEL VILLARREAL FUENTES | Fecha:2026-10-28 14:06:19 | FIRMANTE

Fqx9OYAjHuaW/idBcBOg5CQocLC7E7mU/m5eSsPE4NbBHxeEm2cpE0Asn1AzL6swtLEpsQDhT4IbULo8HhghtingdwdROsWFwD9ziw9/BWnq/4TZ4Wb6gIJZv2KHUELvY2EcL
8mX1A9JchxE+mir6Sf/sFBBxkYRj5myDmHPHnGpgsdOJj3+Ni0U65C/ir172X+NX5xu1Bi6OvazE63CtdH16x7v6uNrYULVYsBSwyNx80iSMJHujw67V/OEnronNj1t2pSGE8X8KG7
VHzD8OIEbEp+7JwhmkpvVvPmV0p1CFhGRk1E8Q4ZmpHldmCxKfMWQM/8cQVj4BrSFgRGm4A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

iVknDOWUK

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/madOldBIQffoYhuiPhlP2N75bQUhG4Mv

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Encargado de Despacho de la Dirección
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. IRAN ALIA TEJACAL** y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. NELSON AVONCE VERGARA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

NELSON AVONCE VERGARA | Fecha:2026-10-29 10:55:18 | FIRMANTE

ZJYVaVZ5tmv1pMwce6Q2HUYryRLk1/e9l4T9ljTQ7Xu06BhYitST/VmJQ0vNkf5LNPYnXj/IXpGxNVPJq0WQwVxr2mB28zgoKTHBe5xY88iKmoAvhra1vPTWPjPj9A0uXPWzY+mEldufIOl41fORX/J1WXli+cDf+UhAAFlMdCzfxr7N10xwD9kXewtaQQ4mC7eszeeaHBp6VQbMlu37UjO1iHq2otOEngkXGMDoGYm9bhfVU8e66FxiHQ6/ikLI/+V02zMq28rfOrUTd2kpIQcKcbitnWuK4jyVtsgBz2zD2MgxDEXhh9SOD/zEgOcbLopGPjv8gD/AGgLSUdSDyg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

YoPWAu4QZ

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/pxEwTkgPvJzkVDiZqwYX9dFAwMOobsY1

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Encargado de Despacho de la Dirección
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. IRAN ALIA TEJACAL** y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. OSCAR GABRIEL VILLEGAS TORRES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

OSCAR GABRIEL VILLEGAS TORRES | Fecha:2026-10-27 20:48:24 | FIRMANTE

Zgbvkg0BBlyMlhQpGgcmwsynvkq6fwQXKn17uSivPmBoPUPic9vzO+eLwlyRVVTUBPZCxFchim0CMO5QIg8CQqpMT6Gev4UeCyBD/iFyrPmphBz4leDzFZRcU90j4PJfWtFEVE/VX+KjzS7qn4Any0GX78dViUmicgpIxEuwm3k3lYzNo9eD08UAleCUsFdR9WuXbJIOKgEOJenk/f1NTV0HoF2BU1uH0VGI+nYkKqPuDY2fam5XP+GSYBPwW6PCMAmmzIrpulzYvxZCczhfE2LteKGA8wTTgO98LSfulq/IQ0XgcwJRXU9/0rKW62TfZXfjijUybP5lVhNlSYgofA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

MDsx4uGmy

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/yKQ1LdqkOJxxzBShLrbon0mHeMGfl86z

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. DANTE VLADIMIR GALINDO GARCÍA
Jefe de Programas Educativos de Posgrado
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. IRAN ALIA TEJACAL** y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

PORFIRIO JUAREZ LOPEZ | Fecha:2026-10-28 10:23:57 | FIRMANTE

Otca4el6q2BmKez98uoZoc/JrdYTnlR7/oyPsJAtZ78CzeVK6NrQSFWDMJlFqspmN7YQygShxv66ghJuhb3sIkVIC2wNpboispZAMd18Oc0WcXEZvdcPAZZNmx8GaJkIldC2SKIyydTeNay8F33t4H27L1ZyUcD4vJxSQ9XCkLuO8wItwTD2Ctf5KQbzGtplyHqIuneIVpZWVQkZkWwanxJBqGfRY1HHIsAdjflpgwGhXxLKssbutSJUgo91tDQq+nbijIY//ZL50xbaOwaB9f2rrpQ1K6is6Wtsj+5ZeKt2LDBCU3G7oHoJNVVrrY5qREUXEqX5aCmru5RrReTcXg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

BR40LQOZH

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/priK9NGGyPtBeXxuhv4XEqmELD4QB23V

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Encargado de Despacho de la Dirección
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. IRAN ALIA TEJACAL** y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DRA. ERIKA ROMÁN MONTES DE OCA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ERIKA ROMAN MONTES DE OCA | Fecha:2026-10-28 08:39:43 | FIRMANTE

dPx2qZnOLIkoLTBmqAy4qnFD9E0izyUCh+q/iS9hsxnXC0tK+p2Ef8Ij3FALwrSCwOwFi2DIvSolqGRyfLIiLV5AoqoB+8As75YJlCfGe+SsrON/C20zEsfNzf8pDw6x3/ROTtTcpmz/BK
WmhhtfNnWmMeuiE4udaol2H9sBncl/qzZ2xZRM0w2Gb9y+qIg/xHemhBp6Y5UnTuYqYDaPr7Kvllc1AaHSHp/5kYBkFDTdGBR6o3JQScYjEBYY/Qw10V3a32tUOELzeCfQwHolc
2q6ATk8c5C+os7zxtnPbBMZm3e4AvxL7KdEv4ua57xlu3bVf05neRsrqtAzAh2GOQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

ua9A0DYNL

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ITQfZIFB4GfY8gUh7I96oSjhXbQt5agF

Cuernavaca, Morelos, 23 de octubre de 2026
Asunto: Voto aprobación tesis

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Encargado de Despacho de la Dirección
de la Facultad de Ciencias Agropecuarias
PRESENTE.

Por medio del presente le informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado **Aplicación de recubrimiento comestible de quitosano y retardadores de maduración en poscosecha de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.)** que presenta la alumna **GLORIA ARANTXA SOTELO ALCÁNTARA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. IRAN ALIA TEJACAL** y la codirección del **DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que la alumna continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta

DRA. GLORIA ALICIA PÉREZ ARIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

GLORIA ALICIA PEREZ ARIAS | Fecha:2026-10-27 20:21:42 | FIRMANTE

UKw5VNYKKVsO0v+y1evlOkOM5Xb8pXRICStbptCNiEwlKFBXTXwqUo28dsjPdFwk0OWchKf/mKa7xpfKPK4O4eT+l9dWkJygYfC7/02uIlOJ7p7LZB+J2UPSQTL6z7eK6gUcw7w5nNVjjcBF7yzPtusS4cRNNNCCooJFw1DqKonOyYQ4O5+q/Xjoz8vefnzj43G879oocUmeba8gM995HcWfeF+6XSauaV7YuBgl6PbuzpjmZgKSp2tq3nQu2z0LmdMXwMN+zKyWrbA8ZexrzH6qPxYVW+cwyQuZphjroIdk5mnJW2X47PuhxZ3GihqJR2VqBCUGGAIdghNBmK81ZQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

74wsnSKRA

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/cWZOzJZwzrjX2MTQT16f51POBzWz6NYC