

MODELIZACIÓN DE LA TASA RESPIRATORIA DE CAQUI ROJO BRILLANTE

Durá, A.¹; Almela, C.¹; Ortolá, M.D.¹.

RESUMEN

Dado el importante incremento que ha experimentado la producción de caqui en los últimos años en España, más concretamente la variedad “Rojo brillante”, se hace inevitable la introducción de métodos de conservación para adaptarse a la demanda del mercado actual.

La temperatura ha sido identificada como el factor externo más importante capaz de influenciar la respiración. Por tanto, es muy importante conocer la influencia de la temperatura sobre la tasa respiratoria. Además, la tasa respiratoria se ve influenciada por la geometría del corte. En general, hay un aumento en la tasa respiratoria de las frutas troceadas frente a las enteras, asociado a una aceleración de su metabolismo por el estrés inducido por las heridas provocadas con el corte.

En el presente estudio se ha modelizado la evolución de la tasa respiratoria de rodajas y cubos de Caqui (*Diospyros kaki*) de la variedad Rojo Brillante persimon. A partir de los resultados experimentales obtenidos mediante un sistema de análisis estático cerrado a diferentes temperaturas de almacenamiento (1, 5, 10 y 15 °C), monitorizando el consumo de O₂ y la producción de CO₂ a lo largo del tiempo, a través del análisis del espacio de cabeza.

Se han utilizado diferentes modelos predictivos basados en regresiones lineales y no lineales. Los parámetros obtenidos para todos ellos, así como la predicción obtenida sobre los datos experimentales en cada caso, han permitido comprobar el grado de predicción de cada uno de ellos. Todos los modelos desarrollados fueron validados a una temperatura de 7°C.

PALABRAS CLAVE: Caqui, Tasa respiratoria, Modelización, Mínimamente procesado, Coeficiente de regresión lineal, Arrhenius.

RESUM

Donat l'important increment que ha experimentat la producció de caqui en els últims anys a Espanya, més concretament la varietat “Rojo brillante”, es fa inevitable la introducció de mètodes de conservació per a adaptar-se a la demanda del mercat actual.

La temperatura ha estat identificada com el factor extern més important capaç d'influenciar la respiració. Per tant, és molt important conèixer la influència de la temperatura sobre la taxa respiratòria. A més, la taxa respiratòria es veu influenciada per la geometria del cort. En general, hi ha un

¹ Instituto de Ingeniería de Alimentos para el desarrollo. Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, 14. 46022. Valencia. España.

augment en la taxa respiratòria de les fruites trossejades enfront de les senceres, associat a una acceleració del seu metabolisme per l'estrès induït per les ferides provocades amb el cort.

En el present estudi s'ha modelitzat l'evolució de la taxa respiratòria de rodanxes i poals de Caqui (*Diospyros kaki*) de la varietat "Rojo Brillante" persimon. A partir dels resultats experimentals obtinguts mitjançant un sistema d'anàlisi estàtica tancat a diferents temperatures d'emmagatzematge (1, 5, 10 i 15 °C), monitoritzant el consum d'O₂ i la producció de CO₂ al llarg del temps, a través de l'anàlisi de l'espai de cap.

S'han utilitzat diferents models predictius basats en regressions lineals i no lineals. Els paràmetres obtinguts per a tots ells, així com la predicció obtinguda sobre les dades experimentals en cada cas, han permès comprovar el grau de predicció de cadascun d'ells. Tots els models desenvolupats van ser validats a una temperatura de 7°C.

PARAULES CLAU: Caqui, Taxa respiratòria, Modelització, Mínimament processat, Coeficient de regressió lineal, Arrhenius.

ABSTRACT

Given the important increase that has undergone the khaki production in the last years in Spain, more concretely the "Rojo brillante " variety, is made the introduction inevitable of conservation methods to adapt to the demand of the present market.

The temperature has been identified as the more important external factor able to influence the breathing. Therefore, it is very important to know the influence of the temperature on the respiratory rate. In addition, the respiratory rate is influenced by the geometry of the cut. Generally, there is an increase in the respiratory rate of the fruits divided against the whole ones, associated to an acceleration of his metabolism by the stress induced by the wounds caused with the cut.

In the present study, it has modelled the evolution of the respiratory rate of slices and buckets of Khaki (*Diospyros kaki*) of the "Rojo Brillante" variety persimon. From the obtained experimental results by means of a system of closed static analysis to different temperatures from storage (1, 5, 10 and 15 °C), monitoring the consumption of O₂ and the CO₂ production throughout the time, through analysis of the head space.

Different predictive models based on regressions linear and nonlinear have been used. The parameters obtained for all of them, as well as the prediction obtained on the experimental datas in each case, has allowed to verify the degree of prediction from each of them. All the developed models were validated to a temperature of 7°C.

KEY WORDS: Khaki, respiratory Rate, Modelling, Minimally processing, Coefficient of linear regression, Arrhenius.

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo VIII se cultiva el caqui en China y Japón donde tiene su origen. En los países occidentales fue introducido teniendo en cuenta las condiciones de cultivo de su zona de origen; ésta se produjo de manera reciente en dos vertientes: en EE.UU. a principios del siglo XIX y en Francia, España e Italia hacia 1870.

La variedad de caqui “Rojo Brillante” surgió en 1950, en el término municipal de Carlet (Valencia) como una mutación de la antigua variedad “Citalino”. Diez años más tarde, se injertó la primera plantación homogénea en L’Alcúdia (Valencia). En la actualidad, el cultivo del caqui en la Comunidad Valenciana está centralizado en esta variedad debido a que presenta muy buenas condiciones de cultivo, rápido desarrollo, elevado rendimiento y una excelente calidad de sus frutos (tamaño, color, características organolépticas, etc.) (Salvador et al., 2006). Esta variedad “Rojo Brillante” es la única amparada por la Denominación de Origen Caqui Ribera del Xúquer.

Con la aparición de una variedad, comercialmente denominada “Persimon”, de carne firme y color anaranjado, el cultivo experimenta un crecimiento sin precedentes en esta zona, pasándose en tan solo 8 años de apenas 1.000 Tn. a una producción superior a las 70.000 Tn. Además es una fruta muy beneficiosa para la salud con un alto contenido en fibra, vitamina A y licopeno, sustancia antioxidante que ayuda a prevenir los procesos degenerativos. También contiene gran cantidad de fósforo, un mineral indispensable.

Los hábitos de alimentación humana han cambiado mucho en las dos últimas décadas. El actual ritmo de vida, con escaso tiempo para preparar comidas equilibradas, ha provocado la demanda de productos vegetales naturales, frescos, saludables y dispuestos para consumir, como los mínimamente procesados en fresco (MPF), denominados comercialmente de “Cuarta gama” de la alimentación. Así, la oferta de productos MPF ha aumentado notablemente en los países industrializados, siendo muy competitivos y aportando nuevos productos y desarrollando nuevas tecnologías emergentes y sostenibles para garantizar la calidad sensorial y nutritiva y la seguridad alimentaria.

La vida útil de las frutas mínimamente procesadas es uno de los factores más relevantes en su comercialización. Para conseguir prolongar su almacenamiento, es necesario controlar la respiración y los posibles fenómenos anaerobios durante el envasado, que pueden provocar cambios en el aspecto, aroma y sabor del producto, teniendo como consecuencia el rechazo del consumidor.

La respiración es un proceso central en el metabolismo de las frutas, proporciona energía para las reacciones anabólicas que ocurren en la maduración y el mantenimiento celular durante el almacenamiento. (Gomes et al, 2010). Envuelve una serie de reacciones de oxido-reducción donde una variedad de sustancias encontradas en las células son oxidadas a CO₂. (Kays, 1991).

A parte de su importancia fisiológica, el conocimiento de parámetros respiratorios de la fruta posee relevancia tecnológica, particularmente hacia el desarrollo de envases con atmósfera modificada (AM). La respiración de las

frutas está afectada por muchos factores, de los cuales temperatura y presión parcial de oxígeno ejercen un fuerte efecto. (Gomes et al, 2010)

La respiración puede ser expresada como la producción de CO_2 (RCO_2) y el consumo de O_2 (RO_2). El cociente respiratorio (CR) es la proporción de CO_2 producido por O_2 consumido por el producto y su valor oscila entre 0.7-1.3 en la respiración aeróbica dependiendo del sustrato metabólico. (Kader et al., 1989; Iqba et al, 2009).

La tasa respiratoria (TR) se ve influenciada por una serie de factores, de entre los cuales, la temperatura es una de las más influyentes. A altas temperaturas, la desnaturalización enzimática puede ocurrir y reducir la tasa respiratoria. Si las temperaturas son demasiado bajas, lesiones físicas se podrían producir, lo que llevaría a un aumento de la tasa respiratoria (Fidler & North, 1967).

El objetivo es introducir una tecnología de conservación, para poder alargar el periodo comercial manteniendo la calidad exigida por el consumidor y permitir abrir expectativas de comercialización, ampliando así la cuota de exportación a mercados internacionales.

Desde que AM puede alargar la vida útil y el periodo en el mercado de fruta fresca cortada (Bai et al., 2001; Martínez-Ferrer et al., 2002) un gran esfuerzo ha sido dedicado para desarrollar y verificar envases apropiados, y optimizar presiones parciales de oxígeno y dióxido de carbono en el interior de los envases (Kader et al., 1989; Fonseca et al., 2002).

La atmósfera óptima para el almacenamiento de producto entero y cortado puede diferir mucho debido a cambios metabólicos, cambios en la resistencia a la difusión de gas (Beaudry, 2000; Watkins, 2000). Además la vida de almacenamiento de los productos cortados es más corta que la de los productos enteros, dado que la geometría del corte influencia sobre la tasa respiratoria. Por tanto, altas presiones de CO_2 y bajas de O_2 , que serían perjudiciales para el fruto entero durante largos periodos de almacenamiento, pueden ser útiles para aumentar la calidad y la vida útil de los productos frescos cortados (Gunes, et al., 2001).

El principal beneficio del uso de AM en la calidad de frutas y hortalizas es la reducción cuantitativa y cualitativa de las pérdidas durante el manejo poscosecha, lo que se traduce en su creciente demanda durante el transporte y almacenamiento posterior.

El diseño de AM para productos frescos requiere un adecuado modelo de predicción para la tasa respiratoria como función de la temperatura y la composición de gas (Mahajan et al., 2007; Fonseca et al., 2002; Hagger et al., 1992; Iqba et al, 2009)

El presente trabajo fue desarrollado con los siguientes objetivos específicos:

- (a) Determinar la tasa respiratoria del caqui mediante el uso de un sistema cerrado estático a diferentes temperaturas y formas de corte.
- (b) Desarrollar y verificar un modelo predictivo para la tasa respiratoria del caqui en función de las concentraciones de O_2 y CO_2 , a diferentes temperaturas y geometría de corte, que posteriormente pueda ser usado en el diseño de AM en caqui.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Para la realización del presente estudio se empleó como materia prima Caqui (*Diospyros kaki*) de la variedad Rojo Brillante persimon, adquirido en un supermercado local en los días previos al inicio de cada tratamiento. A continuación se atemperaron en cámara a diferentes temperaturas 1°C, 5°C, 7°C, 10°C y 15°C (PSelecta, modelo Medilow L y Hotcold-A, 500L, Barcelona, España) hasta el momento de su procesado.

Preparación de las muestras

En primer lugar, se realizó un lavado superficial de la pieza con agua corriente para eliminar restos de tierra adheridos a la superficie, previamente atemperada el agua a diferentes temperaturas 1°C, 5°C, 7°C, 10°C y 15°C, añadiendo al agua, en la dosis recomendada por el fabricante, una solución de hipoclorito de sodio al 0,03 % (v/v) (Marca Amukina, Laboratorios Angelini, Farma-Lepori), un producto comercial especial para desinfección de material vegetal. Tras el lavado, el caqui pelado se cortó en rodajas de 1,5 cm de espesor y 6,5 cm de diámetro, con un sacabocados especialmente diseñado para la experiencia. Por otra parte, también se obtuvieron cubos de 2 x 2 x 1,5 cm.

Caracterización Físicoquímica

La materia prima se caracterizó físicoquímicamente. Para ello, se trituró una muestra representativa de los caquis utilizando un homogeneizador Ultraturrax modelo T25 (IKA Labortechnik, Alemania), durante el tiempo necesario para obtener una muestra suficientemente homogénea. Con este material se llevaron a cabo las siguientes determinaciones:

HUMEDAD

La humedad del caqui fresco, a partir del triturado homogéneo, se realizó según el método oficial de la AOAC (AOAC, 2000) para frutas ricas en azúcar.

Las muestras fueron colocadas en una estufa a vacío (Selecta, modelo Contero 150L, Barcelona, España) a una presión de 10 mm Hg y a una temperatura de 60°C y secadas hasta alcanzar peso constante. El agua evaporada se calculó a partir de la diferencia de peso de la muestra antes y después de ser sometida al secado, determinada con una balanza analítica METTLER (PB 303-L, e= 0,01 g y precisión d= 0,001 g).

°BRIX

Se analizó a 20°C por refractometría con un refractómetro tipo ABBE (Atago Co Ltd., Japón), cuya precisión es de 0,1°. Los resultados fueron expresados en gramos de sólidos solubles por gramo de muestra aplicando la ecuación 1.

$$x^{ss} = \frac{x^w \cdot (^\circ\text{Brix}/100)}{1 - (^\circ\text{Brix}/100)} \quad (1)$$

donde x^{ss} es la fracción másica de sólidos solubles y x^w fracción másica de agua en la muestra.

pH

Se determinó el pH de las muestras con un pH-metro de sobremesa modelo C831 (Consort, Bélgica), de precisión 0.01°.

Análisis de la tasa respiratoria

La tasa respiratoria, consumo de O_2 y producción de CO_2 , en caqui fue medida mediante un sistema estático cerrado. Este sistema de medida ha sido muy mencionado en la literatura (Cameron et al., 1989; Hagger et al., 1992; Morales-Castro et al., 1994; Ratti et al., 1996; Lee and Lee, 1996; Jacxsens et al., 2000; Jaime et al., 2001; Hong and Kim, 2001; Mahajan and Goswami, 2001; Fonseca et al., 2002; Song et al., 2002; Lencki et al., 2004; Thiele et al., 2006; Techavuthiporn et al., 2008 ; Bhande et al., 2008; Iqba et al, 2009).

El producto fue colocado en un recipiente hermético, analizándose los cambios en las concentraciones de estos gases en el espacio de cabeza a lo largo del tiempo.

Por un parte, aproximadamente 300 g de rodajas fueron introducidas en cámaras de vidrio hermético ($V= 1,937$ L) previamente atemperadas en la cámara de refrigeración a la temperatura de cada tratamiento (1, 5, 7, 10 y 15 °C).

Por otra parte, aproximadamente 400 g de cubos se introdujeron en cámaras de vidrio hermético ($V= 0,930$ L) previamente atemperadas en la cámara de refrigeración a la temperatura de cada tratamiento (1, 5, 7, 10 y 15 °C).

Una vez llenos, los botes se cerraron rodeando la tapa con parafilm (Pechiney Plastic Packaging, Inc. Menasha) para asegurar la estanqueidad o hermeticidad de los botes. Se procedió al análisis de los gases del espacio de cabeza (O_2 y CO_2). La toma de muestras de los gases se realizó con una aguja (0,8 mm de diámetro) conectada a un filtro y al tubo conector con un analizador de gases PBI Dansensor CheckMate II. Las medidas se tomaron cada hora, siete medidas diarias durante 7 días para cada temperatura, registrando la variación en la concentración de gases a lo largo de dicho periodo de tiempo.

Todos los ensayos se llevaron a cabo por triplicado para cada temperatura y geometría de corte, como se muestra a continuación en la figura 1.



FIGURA 1. Muestra de rodajas y cubos.

Modelización del comportamiento respiratorio.

Tanto la emisión de CO₂ como el consumo de O₂ pueden ser utilizados para medir la tasa de respiración (TR) de las plantas (Azcón-Bieto&Talón, 2000). La tasa respiratoria se define como la cantidad de anhídrido carbónico emitido y de oxígeno consumido por kg de fruta y por hora (Fonseca, et al., 2002).

La tasa respiratoria experimental se calculó teniendo en cuenta la variación de la concentración de gas analizada con el tiempo (Kays, 1991) (Ec.2 y 3):

$$TRO_2 = \left[\frac{(GO_2)_t - (GO_2)_{t+1}}{\Delta t} \right] \cdot \frac{Va}{M} \quad (2)$$

$$TRCO_2 = \left[\frac{(GCO_2)_{t+1} - (GCO_2)_t}{\Delta t} \right] \cdot \frac{Va}{M} \quad (3)$$

donde TRO₂ y TRCO₂ son las tasas respiratorias de O₂ (mLO₂kg⁻¹h⁻¹) y de CO₂ (mLCO₂kg⁻¹h⁻¹) respectivamente, GO₂ y GCO₂ son las concentraciones de gases en el espacio de cabeza, t el tiempo (h), Va el volumen de aire en el recipiente (mL) y M el peso de la muestra (kg).

Se han aplicado diferentes modelos que intentan explicar el comportamiento respiratorio de frutas como consecuencia de los cambios en la atmósfera.

Modelo 1

La determinación de la TR se determinó a partir de la pendiente de la recta de regresión lineal para la variación de la concentración en O₂ y CO₂ respecto al tiempo, asumiéndose que la tasa respiratoria es constante en la atmósfera aeróbica de la cámara.

Según este modelo la tasa respiratoria se puede calcular a partir de las siguientes ecuaciones (Ec.4 y 5):

$$TRO_2 = \frac{d[GO_2]}{dt} \cdot \frac{Va}{M} \quad (4)$$

$$\text{TRCO}_2 = \frac{d[\text{GCO}_2]}{dt} \cdot \frac{V_a}{M} \quad (5)$$

siendo $d[\text{GO}_2]/dt$ y $d[\text{GCO}_2]/dt$, la pendiente del ajuste lineal de la variación de la concentración del gas (O_2 o CO_2) con el tiempo.

Modelo 2

Los datos experimentales obtenidos fueron ajustados mediante una función de regresión no lineal de la concentración de los gases en función del tiempo como muestra las ecuaciones 6 y 7 (Mahajan & Goswami, 2001):

$$\text{GO}_2 = 0,21 - \frac{[t]}{[at + b]} \quad (6)$$

$$\text{GCO}_2 = \frac{t}{(at + b)} \quad (7)$$

La variación de la concentración de gases con el tiempo puede entonces calcularse a partir de la primera derivada de las funciones de regresión anteriores (Ec. 8 y 9):

$$\frac{d\text{GO}_2}{dt} = at(at + b)^{-2} - (at + b)^{-1} \quad (8)$$

$$\frac{d\text{GCO}_2}{dt} = -at(at + b)^{-2} + (at + b)^{-1} \quad (9)$$

La tasa respiratoria en términos de O_2 consumido y CO_2 eliminado se calculó para un tiempo determinado sustituyendo los valores de $d\text{GO}_2/dt$ y $d\text{GCO}_2/dt$ obtenidos de las ec. 8 y 9 en las ec. 2 y 3.

Verificación del modelo

El modelo predicho para la tasa respiratoria de caqui fue validado con la tasa respiratoria experimental a una temperatura de almacenamiento de 7°C.

Dicha temperatura se encuentra dentro del rango de las distintas temperaturas estudiadas.

Análisis estadístico

Para la estimación de los parámetros de los diferentes modelos así como el análisis estadístico de los resultados se utilizó la herramienta Statgraphics Plus, versión 5.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Toda la materia prima empleada en los ensayos fue caracterizada fisicoquímicamente para conocer la homogeneidad de la misma. En la tabla que se muestra a continuación (tabla 1) se pueden observar los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas.

TABLA 1. Medias con su desviación estándar.

T^a (°C)	x^{ss}	x^w	pH
1	0,1688±0,0004 (c)	0,805±0,005 (a)	6,00±0,02 (a)
5	0,1418±0,0010 (a)	0,8293±0,0009 (b)	5,763±0,005(b)
7	0,1499±0,0007 (b)	0,828±0,003 (b)	5,81±0,02 (b)
10	0,1755±0,0010 (d)	0,801±0,002 (a)	6,070±0,010 (c)
15	0,140±0,004 (a)	0,837±0,006 (c)	5,88±0,05 (d)

()entre paréntesis grupos homogéneos

Tal y como se observa en la tabla, se ha partido de una materia prima no muy homogénea, existiendo diferencias entre los lotes.

Los resultados obtenidos en este ensayo fueron comparados con la bibliografía (Igual et al, 2008) encontrándose valores del mismo orden.

La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la concentración de gases en el espacio de cabeza en las muestras cortadas en cubos a las diferentes temperaturas de ensayo. Como puede observarse, la velocidad de los cambios en la concentración de gases aumenta con el aumento de la temperatura, observándose tasas de respiración, tanto en términos de consumo de O₂ como de emisión de CO₂ más elevadas a medida que aumenta la temperatura. Este hecho ha sido constatado en numerosos estudios sobre diversas frutas, donde la temperatura es uno de los factores mas influyentes sobre el metabolismo respiratorio (Nakamura et al., 2004; Ravindra et al., 2008; Bhande et al., 2008).

Para cada temperatura, la velocidad de respiración va disminuyendo con el tiempo, lo que se evidencia por el descenso paulatino en la pendiente. Esto podría atribuirse al efecto que el aumento de la concentración de CO₂ y el descenso de la concentración de O₂ en el espacio de cabeza tienen sobre el metabolismo respiratorio del fruto.

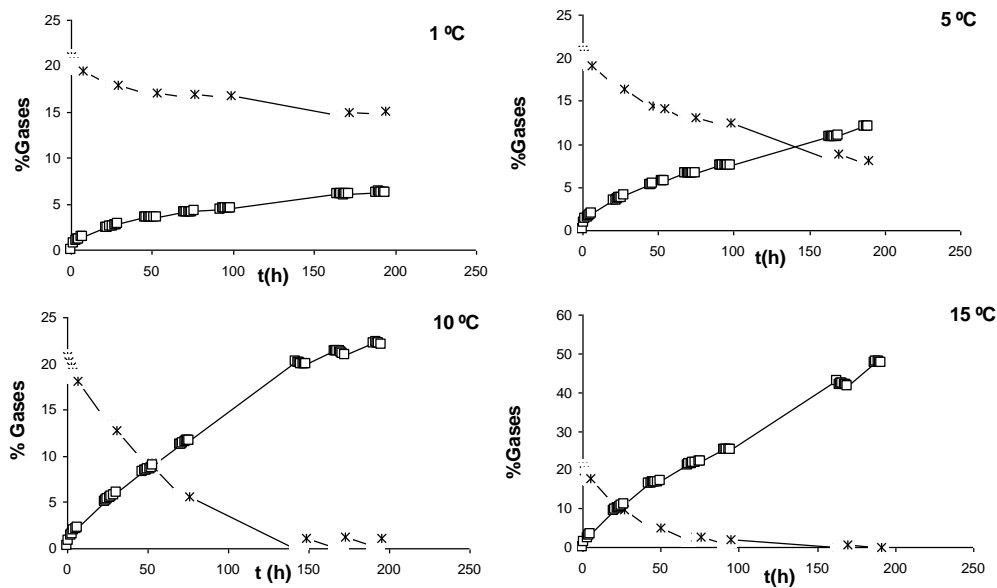


FIGURA 2. Variación de la concentración de gases (*: % O₂ y □: % CO₂) en el espacio de cabeza con el tiempo a diferentes temperaturas.

Estimación de parámetros: modelo 1

Este modelo asume que la velocidad de respiración permanece constante con el tiempo, mientras que, como se ha comentado anteriormente, esta varió durante el tiempo ensayado. Por este motivo se seleccionó para el ajuste el primer tramo lineal de las curvas mostradas en la figura 2. En la mayoría de los casos se tomó para el ajuste la variación de la concentración de gases en el espacio de cabeza durante las primeras 48 horas de análisis. Sólo para la fruta cortada en cubos almacenada a 15°C el punto de inflexión de la curva se observó a las 24 horas de almacenamiento, por lo que se fijó ese tiempo para el ajuste lineal. Así, la TR en términos de consumo de O₂ y emisión de CO₂ calculadas para todas las temperaturas ensayadas y las dos geometrías de corte según el modelo 1 se muestran en la figura 3. La figura 3 muestra también el coeficiente respiratorio (CR) calculado según la ecuación 10:

$$CR = \frac{TRO_2}{TRCO_2} \quad (10)$$

Como puede observarse, en este primer período de almacenamiento en el que no parece existir influencia de los cambios en la concentración de gases de la atmósfera, existe una clara influencia de la temperatura sobre las tasas respiratorias, expresadas tanto como consumo de O₂ como emisión de CO₂. A bajas temperaturas (1 y 5°) el análisis estadístico aplicando Anova multifactorial muestra que, tanto para la TRO₂ como para la TRCO₂ no existen diferencias significativas pero sí las hay para el resto de las temperaturas, 10 y 15°C. El mismo análisis no mostró diferencias significativas en la TRO₂ para las dos geometrías de corte aunque sí en la TRCO₂. Esto podría explicarse teniendo en cuenta la propia metodología de análisis utilizada. En la determinación de tasas respiratorias mediante sistema cerrado, se asume que las variaciones en el espacio de cabeza son asumibles directamente a la

respiración del fruto. Sin embargo, estas concentraciones son el resultado de la respiración celular y del intercambio gaseoso (resistencias a la difusión de gases, solubilidad de los gases y difusión interna) (Andrich et al., 1991; Kader, 1987). Así, el CO₂ generado en la matriz mitocondrial difunde hacia la solución celular y espacios intercelulares. Después sale al exterior en fase gas a través de las aberturas del sistema dérmico o roturas celulares. La mayor superficie expuesta en las rodajas podría facilitar los mecanismos de difusión en fase gas al exterior y de ahí la mayor concentración de CO₂ analizada en el espacio de cabeza.

El cociente respiratorio en todos los casos tomó valores cercanos a 1, lo que muestra que no existen cambios en las rutas metabólicas durante el tiempo de análisis. Cabe destacar la diferencia entre las dos geometrías de corte. Así, el CR en muestras cortadas en cubos siempre resulta menor de la unidad, consecuencia de las menores TR de CO₂ analizadas en estas muestras.

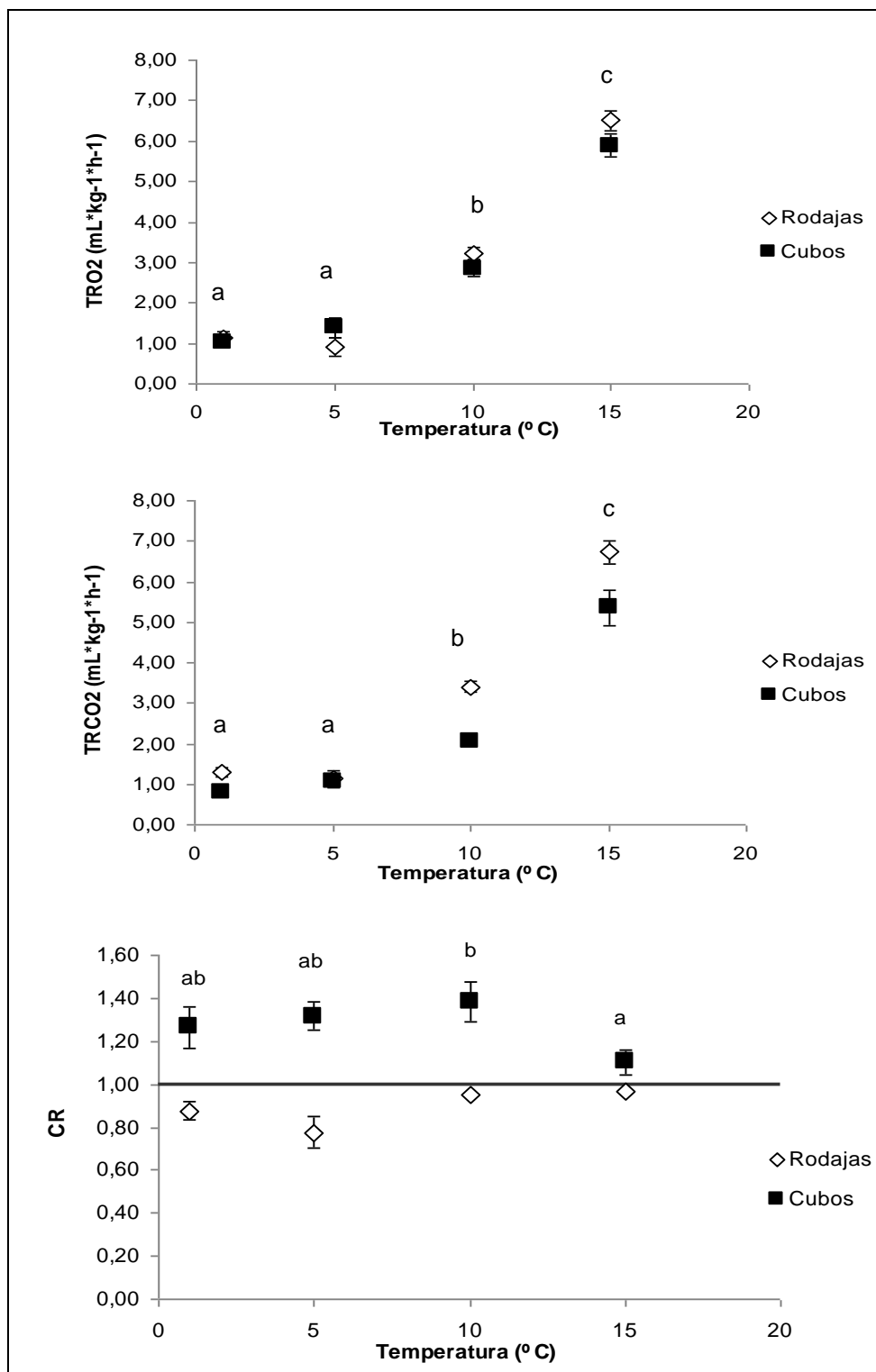


FIGURA 3. TR medias de O₂ y CO₂ y CR de rodajas y cubos de caqui.

Independientemente de la tasa absoluta de respiración, incrementos en la temperatura generan incrementos exponenciales de la respiración. Por esta razón, la modelización del tipo Arrhenius se suele ajustar bien al comportamiento de las frutas almacenadas a distintas temperaturas (Fonseca et al., 2002).

La influencia de la temperatura en la tasa respiratoria se analizó mediante el ajuste del modelo de Arrhenius (Ec.11).

$$TR = K \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (11)$$

donde TR es la tasa respiratoria ($\text{mL} / \text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$), k es la constante preexponencial ($\text{mLkg}^{-1} \text{h}^{-1}$), E_a la energía de activación (kJ/mol), R es la constante de los gases ($0.008314 \text{ kJmol}^{-1} \text{K}^{-1}$) y T la temperatura (K).

En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos de la linealización de la ecuación anterior. Según este ajuste, en la tabla 2 se muestran los valores de E_a (kJ/mol), K ($\text{mLkg}^{-1} \text{h}^{-1}$) y el coeficiente de correlación cuadrático (R^2). Puede observarse que los valores correspondientes a 5°C se alejan en ambos casos de la recta, lo que podría atribuirse al menor índice de madurez de esta materia prima, tal y como se comentó anteriormente.

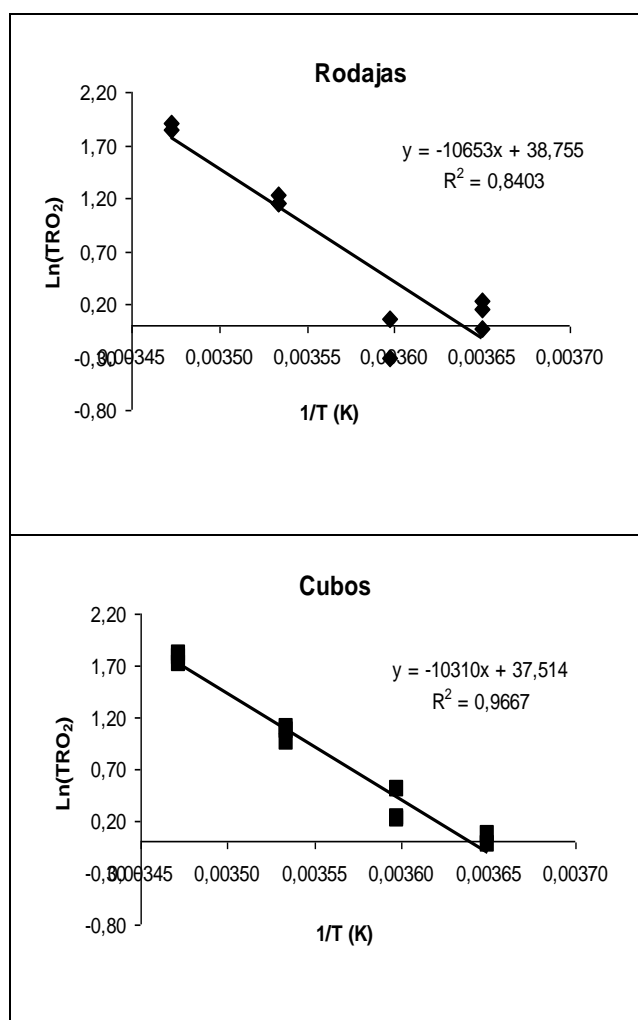


FIGURA 4. Ajuste de Arrhenius para la TR de O₂

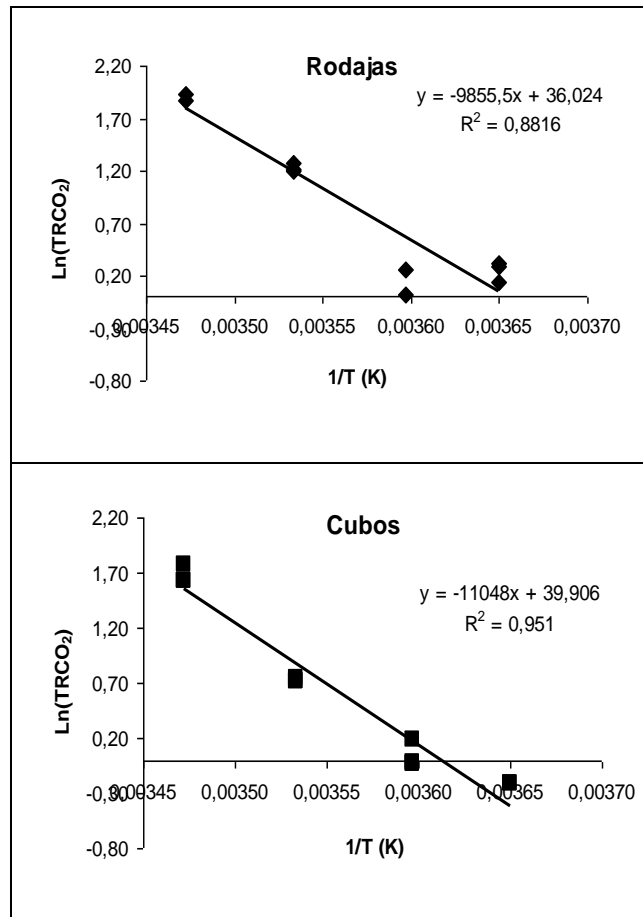


FIGURA 5. Ajuste de Arrhenius para la TR de CO₂

TABLA 2. Valores de E_a, k y R² obtenidos mediante la ecuación de Arrhenius.

	Rodajas		Cubos	
	TRO ₂	TRCO ₂	TRO ₂	TRCO ₂
E _a (kJmol ⁻¹)	89	82	86	92
k (mLkg ⁻¹ h ⁻¹)	6,78E+16	4,41E+15	1,96E+16	2,14E+17
R ²	0,84	0,88	0,97	0,95

De los datos obtenidos, se observa que la energía de activación en términos de consumo de O₂ y CO₂ es muy similar para las dos geometrías de corte. Los valores de la energía de activación son también del mismo orden para las dos geometrías.

Estimación de parámetros: modelo 2

Respecto a la estimación del modelo 2, la tabla 3 muestra los valores obtenidos de los parámetros a y b mediante regresión no lineal de los resultados experimentales para las temperaturas ensayadas aplicando las ecuaciones 6 y 7 junto con los coeficientes de correlación de los ajustes del modelo.

TABLA 3. Valores de los coeficientes de regresión para el modelo 2.

Forma geométrica	T ^a almacenamiento (° C)	Respiración expresada en términos de	Coeficientes de regresión		R ²	
			a	b		
Rodajas	1	O ₂	61,630	1685,380	0,98	
		CO ₂	46,978	1287,050	0,95	
	5	O ₂	32,775	3978,520	0,96	
		CO ₂	28,426	2328,010	0,96	
	10	O ₂	6,145	1367,040	0,99	
		CO ₂	5,234	1220,800	0,98	
	15	O ₂	1,130	765,872	0,99	
		CO ₂	0,661	707,136	0,99	
	Cubos	1	O ₂	14,031	504,468	0,99
			CO ₂	12,595	807,017	0,98
		5	O ₂	4,653	621,108	0,96
			CO ₂	4,969	799,417	0,95
10		O ₂	3,441	248,481	0,99	
		CO ₂	2,267	451,062	0,99	
15		O ₂	3,517	112,079	0,97	
		CO ₂	2,081	160,781	0,98	

Como puede observarse, ambos parámetros a y b aumentan a medida que disminuye la temperatura, estando el parámetro b mucho más influenciado por la temperatura. Valores similares para ambos parámetros han sido encontrados en otras frutas como la banana (Bhande et al., 2008), manzanas (Goswami, 2001) y melón (Burdeos, 2009).

Puede apreciarse que el valor del coeficiente de correlación cuadrático, R², obtenido es $\geq 0,95$, lo que implica una alta probabilidad en la relación funcional de los datos ajustados.

En la tabla siguiente (tabla 4) se muestran los valores obtenidos de E_a (kJmol⁻¹), k (mLkg⁻¹h⁻¹) y el coeficiente de correlación cuadrático (R²) obtenidos al ajustar el modelo de Arrhenius que podría explicar la relación entre los parámetros del modelo 2 con la temperatura.

De los datos obtenidos se observa que la relación entre los parámetros a y b puede explicarse con el modelo de Arrhenius. El bajo nivel de correlación observado para el parámetro b en las rodajas se debe a la pequeña variación con el tiempo de este parámetro.

TABLA 4. Valores de E_a (kJmol^{-1}), k ($\text{mLkg}^{-1}\text{h}^{-1}$) y R^2 obtenidos mediante la ecuación de Arrhenius.

	Rodajas				Cubos			
	TRO ₂		TRCO ₂		TRO ₂		TRCO ₂	
	a	b	a	b	a	b	a	b
E_a	192,07	50,14	203,90	35,65	60,79	77,14	85,57	76,57
k	2,02E-35	7,67E-7	9,67E-38	2,96E-4	2,61E-11	1,36E-12	5,00E-16	2,65E-12
R^2	0,98	0,46	0,96	0,46	0,72	0,85	0,89	0,87

Verificación del modelo

Todos los parámetros estimados fueron verificados comparando la tasa respiratoria experimental determinada a una temperatura de almacenamiento de 7°C, con la TR calculada a partir de los dos modelos ajustados.

Así, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el ajuste de Arrhenius en el modelo 1, la TR en términos de O₂ y CO₂ se muestran en la tabla 5. En la misma tabla se muestran los valores obtenidos al ajustar linealmente (según modelo 1) las variaciones de concentración en el espacio de cabeza durante las primeras 48 horas analizadas experimentalmente.

TABLA 5. TRO₂ y TRCO₂ teórica y experimental para muestras a 7°C

	TRO ₂		TRCO ₂	
	teórica	experimental	teórica	experimental
Rodajas	2,03	1,8 ± 0,3	2,28	1,9 ± 0,2
Cubos	2,00	2,00 ± 0,16	1,57	1,44 ± 0,01

Los datos obtenidos teóricamente y experimentalmente de la TR de O₂ y CO₂ son similares, lo que indica un buen ajuste de los datos experimentales para el modelo 1.

Para la verificación del modelo 2 se determinaron los parámetros a y b teóricos a partir de los datos de la tabla 4, obteniéndose la variación de la TR teórica que se muestra en la figura 6. En la misma figura aparecen los valores experimentales determinados por las ecuaciones 2 y 3. Puede apreciarse que en ambos casos los datos predichos no se ajustan bien a los experimentales, aunque para los cubos parece existir una mejor correlación. En cualquier caso, este modelo parece no ser útil para predecir el comportamiento de la fruta cuando existen cambios en la TR.

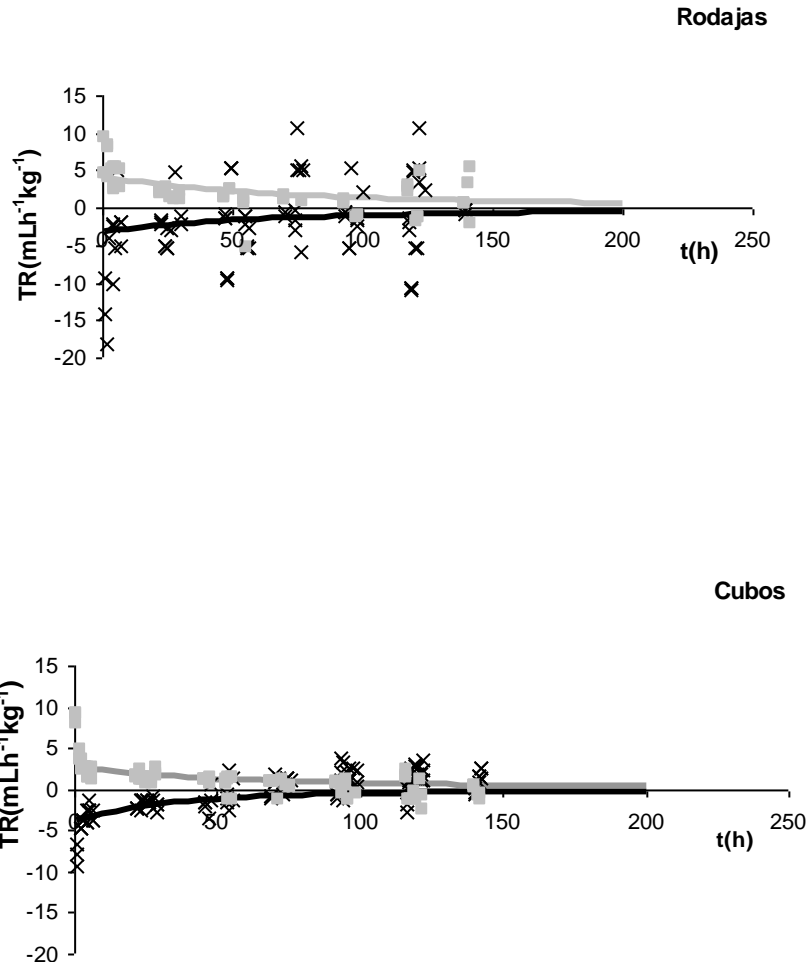


FIGURA 6. Variación de tasas respiratorias experimentales (■: CO₂, x: O₂) frente a predichas (—: CO₂, - - : O₂) por el modelo 2 (7°C).

CONCLUSIONES

La tasa respiratoria del kaki tanto en láminas como en cubos permanece constante siempre que las concentraciones de O₂ en el ambiente se mantienen por encima del 12-15% y el CO₂ por debajo de 7-5%, dependiendo de la temperatura. Esta dependencia de la temperatura puede explicarse mediante el modelo de Arrhenius. Alcanzados dichos niveles, la tasa respiratoria, expresada tanto como O₂ consumido como CO₂ emitido desciende a medida que varían las concentraciones atmosféricas. Este comportamiento puede modelizarse mediante ajustes no lineales siendo los parámetros de dicho modelo muy dependientes de la temperatura.

A través de esta modelización puede predecirse el comportamiento de esta fruta en cualquier atmósfera modificada y temperatura de almacenamiento lo que resulta muy útil para el diseño de envases adecuados para este producto mínimamente procesado.

REFERENCIAS

- AOAC, 2000. Official methods of analysis of AOAC International. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists International. Eds: *William Horwitz, Gaithersburg*
- Andrich, G., Fiorentini, R., Tuci, A., Zinnai, A., & Sommovigo, G. (1991). Tentative model to describe respiration of stored apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116, 478–481.
- Azcón-Bieto, J., Talón, M. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Capítulo 14, pp. (217-233). Ed. MacGraw-Hill Interamerica. y Ed. Universitat de Barcelona.
- Bai, J.-H., Saftner, R.A., Watada, A.E., Lee, Y.S., 2001. Modified atmosphere maintains quality of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.). *Journal of Food Science* 66, 1207–1211.
- Beaudry, R.M. 2000. Response of Horticultural Commodities to Low Oxygen: Limits to the Expanded Use of MAP. *Hort-Technology*. 10, 491-500
- Bhande, S.D., Ravindra M.R., Goswami, T.K. 2008. Respiration rate of banana fruit under aerobic conditions at different storage temperatures. *Journal of Food Engineering*, 87, 116-123.
- Burdeos, I.; Albors, A.; Ortolá, M.D., 2009. Modelización de la tasa respiratoria de melón a diferentes temperaturas. Instituto de Ingeniería de Alimentos para el desarrollo. Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Cameron, A.C., Boylan-pett, W., Lee, J., 1989. Design of modified atmosphere packaging systems: modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits. *Journal of Food Science* 54 (6), 1413–1416.
- Fidler, J. C., & North, C. J. (1967). The effect of conditions of storage on the respiration of apples. I. The effects of temperature and concentrations of carbon dioxide and oxygen on the production of carbon dioxide and uptake of oxygen. *Journal of Horticultural Science*, 42, 189–206.
- Fonseca, S.; Oliveira, F; Brecht, J. 2001. Modelling respiration rate of fresh fruits vegetables for modified atmosphere packages: a review. *Journal of Food Engineering*. 52 (2002) [99-119].
- Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R., Frias, J.M., Brecht, J.K., Chau, K.V., 2002. Modelling respiration rate of shredded Galega kale for development of modified atmosphere packaging. *Journal of Food Engineering* 54 (4), 299–307.
- Gomes, M.H., Beaudry, R.M., Almeida, D.P.F., Malcata, F.X., 2010. Modelling respiration of packaged fresh-cut 'Rocha' pear as affected by oxygen concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*.
- Gunes, G., Watkins, C.B., Hothckiss, J.H. 2001 Physiological Responses of Fresh-cut Apple Slices Under High CO₂ and Low O₂ Partial Pressures. *Postharvest Biology and Technology* 22 197-204
- Hagger, P.E., Lee, D.S., Yam, K.L., 1992. Application of an enzyme kinetics based respiration model to closed system experiments for fresh produce. *Journal of Food Process Engineering* 15 (2), 143–157.
- Hong, S., Kim, D., 2001. Influence of oxygen concentration and temperature on respiratory characteristics of fresh-cut green onion. *International Journal of Food Science and Technology* 36 (3), 283–289.
- Igual M., Castello´ M.L., Ortolá´ M.D., Andres A., 2008. Influence of vacuum impregnation on respiration rate, mechanical and optical properties of cut

- persimmon. Institute of Food Engineering for Development and Food Technology Department, Polytechnic University of Valencia.
- Jacxsens, L., Devlieghere, F., Rudder, T., Debevere, J., 2000. Designing equilibrium modified atmosphere packages for fresh-cut vegetables subjected to changes in temperature. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol (Iwt)*. 33 (3), 178–187.
- Jaime, P., Salvador, M.L., Oria, R., 2001. Respiration rate of sweet cherries: burlat, sunburst and sweetheart cultivars. *Journal of Food Science* 66 (1), 43–47.
- Kader, A. A. (1987). Respiration and gas exchange of vegetables. In J. Weichmann (Ed.). *Postharvest physiology of vegetables* (pp. 25–43). New York, USA: Marcel Dekker.
- Kader, A.A., Zagory, D., Kerbel, E.L., 1989. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 28 (1), 1–30.
- Kays, S.J., 1991. Metabolic Processes in harvested products respiration. Post Harvest Physiology of Perishable Plant Products. *Van Nostrand Reinhold Publication, NY*.
- Lee, J.J., Lee, D.S., 1996. A dynamic test for kinetic model of fresh produce respiration in modified atmosphere and its application to packaging of prepared vegetables. *Foods and Biotechnology* 5 (4), 343–348.
- Lencki, R.W., Zhu, M., Chu, C., 2004. Comparison of unsteady and steady state methods for produce respiration rate determination: 1. Model development and validation. *Postharvest Biology and Technology* 31 (3), 229–238.
- Mahajan, P.V., Goswami, T.K., 2001. Enzyme kinetics based modelling of respiration rate for apple. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79 (4), 399–406.
- Mahajan, P.V., Oliveira, F.A.R., Montañez, J.C., Frias, J., 2007. Development of userfriendly software for design of modified atmosphere packaging for fresh and fresh-cut produce. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 8 (1), 84–92.
- Martínez-Ferrer, M., Harper, C., Pérez-Muñoz, F., Chaparro, M., 2002. Modified atmosphere packaging of minimally processed mango and pineapple fruits. *Journal of Food Science* 67, 3365–3371.
- Morales-Castro, J., Rao, M.O., Hotchkiss, J.H., Downing, D.L., 1994. Modified atmosphere packages of head lettuce. *Journal of Food Processing and Preservation* 18, 295–304.
- Nakamura, N., Rao, D.V.S., Shiina, T., Nawa, Y., 2004. Respiration properties of tree-ripe mango under CA condition. *Japan Agricultural Research Quarterly* 38 (4), 221–226.
- Ratti, C., Raghavan, G.S.V., Garipey, Y., 1996. Respiration rate model and modified atmosphere packaging of fresh cauliflower. *Journal of Food Engineering* 28 (3–4), 297–306.
- Ravindra M.R.; Goswami, T.K. 2008. Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. *Biosystems engineering* 99, 239–248.
- Salvador, A., Arnal, L., Pilar Navarro, P., Martínez-Jávega, J.M. 2006. Estado actual en la conservación del caqui “Rojo brillante”. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*.

- Song, Y., Vorsa, N., Yam, K.L., 2002. Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry. *Journal of Food Engineering* 53 (2), 103–109.
- Tariq Iqbal, Fernanda A.S. Rodrigues, Pramod V. Mahajan , Joe P. Kerry . 2009. Mathematical modeling of the influence of temperature and gas composition on the respiration rate of shredded carrots. *Journal of Food Engineering*.
- Techavuthiporn, C., Nakano, K., Maezawa, S., 2008. Prediction of ascorbic acid content in broccoli using a model equation of respiration. *Postharvest Biology and Technology* 47, 373–381.
- Thiele, T., Kamphoff, M., Kunz, B., 2006. Modeling the respiration of pseudomonas fluorescence on solid-state lettuce-juice agar. *Journal of Food Engineering* 77,853–857.
- Watkins, C.B. 2000. Response of horticultural commodities to high carbon dioxide as related to modified atmosphere packaging. *HortTechnolo.* 10, 501-506