

# Genotype-environment interaction on tuber and chip quality of potato genotypes grown in Central Mexico

## Interacción genotipo-ambiente en la calidad de tubérculos y hojuelas fritas de genotipos de papa cultivados en el centro de México

María Gricelda Vázquez-Carrillo<sup>1\*</sup>; David Santiago-Ramos<sup>1</sup>;  
Oswaldo Ángel Rubio-Covarrubias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, C. P. 56250, MÉXICO.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Sitio Experimental Metepec. Conjunto Sedagro s/n, Metepec, Estado de México, C. P. 52140, MÉXICO.

\*Corresponding author: gricelda\_vazquez@yahoo.com, tel. +52 (55) 38718700, ext. 85364

### Abstract

**Introduction:** The quality of potato tubers is influenced by a group of physical and chemical attributes which define their end-use.

**Objective:** To evaluate the effect of the genotype-environment interaction on the physicochemical characteristics of potato tubers and chips.

**Methodology:** Four genotypes (Fianna, Nau, 5-10, and 99-39) were grown in two locations (Metepec and Raíces) and two consecutive years (2012 and 2013). Internal browning, specific gravity (SG), starch, sugars and phenols were evaluated in tubers, then their effect on chip yield, color and texture was assessed.

**Results:** Tubers with higher SG, dry matter, and starch, as well as lower reducing sugars and phenolic content, were produced in Raíces. These characteristics led to a high yield of potato chips with acceptable color and texture. In contrast, zebra chip (ZC) symptoms were observed in tubers grown at lower altitude, at higher temperatures, and at lower precipitation, negatively affecting potato chip quality.

**Study limitations:** We hypothesized that the higher altitude and lower temperatures would avoid the prevalence of symptoms of the ZC; however, monitoring of insect vectors and infection by PCR is needed.

**Originality:** This is the first study about genotype-environment interaction on end-use tuber quality carried out under experimental conditions where ZC incidence is present.

**Conclusions:** Clone 5-10, grown at higher altitudes, can produce tuber with good attributes for processing into chips, French fries, and fresh consumption.

### Resumen

**Introducción:** La calidad de los tubérculos de papa está influenciada por un conjunto de atributos fisicoquímicos que definen su uso final.

**Objetivo:** Evaluar el efecto de la interacción genotipo-ambiente sobre las características fisicoquímicas de los tubérculos y las hojuelas fritas de papa.

**Metodología:** Se cultivaron cuatro genotipos (Fianna, Nau, 5-10 y 99-39) en dos localidades (Metepec y Raíces) y dos años consecutivos (2012 y 2013). En los tubérculos se evaluó el manchado interno, la gravedad específica (GE), el almidón, los azúcares y los fenoles totales, posteriormente se evaluó el rendimiento, color y textura de las hojuelas fritas.

**Resultados:** En Raíces se produjeron tubérculos con mayor GE, materia seca y almidón, así como con menor contenido de compuestos fenólicos y de azúcares reductores. Estas características propiciaron alto rendimiento en hojuelas fritas con color y textura aceptables. En contraste, se apreciaron síntomas de punta morada de la papa (PMP) en tubérculos cultivados a menor altitud, temperaturas más elevadas y con menos precipitaciones, lo que afectó negativamente la calidad de las hojuelas fritas de papa.

**Limitaciones del estudio:** Se planteó la hipótesis de que la mayor altitud y las temperaturas más bajas evitarían los síntomas de la PMP; sin embargo, es necesario el monitoreo del insecto vector y de la infección mediante PCR.

**Originalidad:** Es el primer estudio sobre el efecto de la interacción genotipo-ambiente en la calidad de tubérculos y su uso final, realizado en condiciones con incidencia de la PMP.

**Conclusiones:** El clon 5-10, cultivado en altitudes más altas, puede producir tubérculos con buenos atributos para ser procesados en hojuelas fritas, papas en bastón y consumo en fresco.

**Keywords:** internal browning, reducing sugars, *Solanum tuberosum* L., zebra chip disease.

**Palabras clave:** manchado interno, azúcares reductores, *Solanum tuberosum* L., enfermedad de la punta morada de la papa.



## Introduction

The quality of potato tubers is influenced by a group of physical and chemical attributes which define their end-use, such as potato skin and flesh color, size and shape, as well as dry matter (DM), starch, and reducing sugars (RS) content (Stark & Love, 2003). Dry matter and starch content are the most important characteristics for the industrial processing because they influence the yield, texture, or oil absorption of cooked and fried products, such as chips and French fries. On the other hand, a lower content of RS is required to avoid non-enzymatic browning and to obtain products with acceptable color and flavor, as well as to reduce acrylamide formation (Pedreschi, Moyano, Kaack, & Granby, 2005).

Genetic, abiotic, and biotic factors affect the chemical composition and physical characteristics of potato tubers. Drought, frosts, and hailstorms damage the plant's foliage, limiting photosynthesis and starch synthesis and accumulation; therefore, tubers with lower specific gravity (SG) are produced (Stark & Love, 2003). Among biotic factors, pests and diseases such as late blight and zebra chip (ZC) are the main causes of reduced tuber quality (Rubio-Covarrubias, Cadena-Hinojosa, & Vázquez-Carrillo, 2013). ZC disease has been considered a new threat for the potato industry; it has been reported to appear in the majority of the potato production regions in Mexico, the U.S., Central America, and New Zealand (Munyanza, 2015; Rubio-Covarrubias, Cadena-Hinojosa, Prager, Wallis, & Trumble, 2017).

Potato tubers infected by ZC can be rejected for both fresh consumption and for chip production. Infected tubers are characterized by the browning of internal tissues, which upon frying become more pronounced, and chips or French fries become very dark with an undesirable taste, rendering them commercially unacceptable (Munyanza, 2012, 2015). Recently, increased levels of phenolics, reducing sugars, enzymes, amino acids, and minerals have been reported to be positively associated with ZC infection (Rubio-Covarrubias et al., 2017; Wallis, Chen, & Civerolo, 2012).

Rubio-Covarrubias, Almeyda-León, Cadena-Hinojosa, and Lobato-Sánchez (2011) reported that the symptoms related to ZC disease, such as the internal browning, decreased as the field production altitude increased; even above 3200 masl the disease symptoms were not significant. These results were related to a decrease in the population of the insect vector (*Bactericera cockerelli* Sulc), which requires warmer conditions to develop. In Mexico, the Toluca Valley is one of the most important potato production regions where ZC incidence is high (Rubio-Covarrubias et al., 2015).

## Introducción

La calidad de los tubérculos de papa está influenciada por un conjunto de atributos físicos y químicos que definen su uso final, tales como el tamaño, la forma y el color de la piel y la pulpa, así como el contenido de materia seca (MS), almidón y azúcares reductores (AR) (Stark & Love, 2003). Los contenidos de MS y de almidón son la característica más importante para el procesamiento industrial, ya que influyen en el rendimiento, la textura, y la absorción de aceite de los productos cocidos y fritos, como las hojuelas y las papas en bastón. Por otro lado, se requiere un contenido menor de AR para evitar el pardeamiento no enzimático y obtener productos con color y sabor aceptables, así como para reducir la formación de acrilamida (Pedreschi, Moyano, Kaack, & Granby, 2005).

Los factores genéticos, abióticos y bióticos afectan la composición química y las características físicas de los tubérculos de papa. En este sentido, la sequía, las heladas y las granizadas dañan el follaje de la planta, lo que limita la fotosíntesis, y la síntesis y acumulación de almidón; por lo tanto, se producen tubérculos con gravedad específica (GE) menor (Stark & Love, 2003). Entre los factores bióticos, las plagas y enfermedades, como el tizón tardío y la punta morada de la papa (PMP), son las principales causas de pérdida de la calidad del tubérculo (Rubio-Covarrubias, Cadena-Hinojosa, & Vázquez-Carrillo, 2013). La enfermedad de la PMP ha sido considerada una nueva amenaza para la industria de la papa, ya que se ha reportado que aparece en la mayoría de las regiones productoras de papa en México, Estados Unidos, Centroamérica y Nueva Zelanda (Munyanza, 2015; Rubio-Covarrubias, Cadena-Hinojosa, Prager, Wallis, & Trumble, 2017).

Los tubérculos de papa infectados por la PMP pueden ser rechazados tanto para consumo en fresco como para la producción de hojuelas fritas. Estos tubérculos se caracterizan por el oscurecimiento de los tejidos internos, que al freírse se vuelve más pronunciado, y las hojuelas fritas o las papas en bastón se tornan oscuras con un sabor indeseable, lo que las hace comercialmente inaceptables (Munyanza, 2012, 2015). Se ha reportado que los niveles elevados de compuestos fenólicos, AR, enzimas, aminoácidos y minerales están asociados con la infección por PMP (Rubio-Covarrubias et al., 2017; Wallis, Chen, & Civerolo, 2012).

Por su parte, Rubio-Covarrubias, Almeyda-León, Cadena-Hinojosa, y Lobato-Sánchez (2011) mencionan que los síntomas relacionados con la PMP, como el manchado interno, disminuyeron conforme incrementa la altitud de producción en campo, incluso por encima de los 3200 msnm los síntomas de la enfermedad no fueron significativos. Estos resultados se relacionaron con

In countries where ZC incidence is high, breeding programs have worked intensely to develop ZC-resistant genotypes, although to date no variety has been released commercially (Rubio-Covarrubias et al., 2017). Several studies have reported the effects of environmental and growth conditions on tuber composition and quality (Hamouz, Cepl, & Dvorak, 2005; Hamouz, Lachman, Dvorak, Juzl, & Pivec, 2006; Leonel et al., 2017); however, to our knowledge, all these studies have been carried out in regions or under experimental conditions where ZC incidence is inexistent. Therefore, the aim of this work was to evaluate the effect of the genotype-environment interaction on the physicochemical characteristics of tubers and their influence on chip yield, color, and texture.

## Materials and methods

### Potato genotypes

Four genotypes were evaluated including three clones (Nau, 5-10, 99-39) and a commercial variety (Fianna) (Table 1).

### Field experimental conditions

Genotypes were grown in the spring-summer seasons of 2012 and 2013, at two locations: Metepec and Raíces, both located in the State of Mexico, Mexico. Metepec (19° 14' 35.39" North Latitude, 99° 35' 27.82" West Longitude, at altitude of 2 600 m), has soil sandy loam, pH 5.6, and 1.1 % organic matter, and ZC incidence at this location is high (Rubio-Covarrubias et al., 2015). In contrast, Raíces (19° 9' 59.78" North Latitude, 99° 47' 53.74" West Longitude, at altitude of 3 500 m) present soil clay loam, pH 5.1, high phosphorus fixation capacity, and 3.2 % organic matter, and ZC incidence is null (Rubio-Covarrubias et al., 2013).

At both locations, potatoes were grown by following the potato production technology of these regions (Rubio-Covarrubias et al., 2000). Field plots consisted of two furrows 8 m in length, with 90 cm spacing between

la disminución de la población del insecto vector (*Bactericera cockerelli* Sulc), que requiere condiciones más cálidas para desarrollarse. En México, el Valle de Toluca es una de las regiones productoras de papa más importantes, y ahí la incidencia de PMP es alta (Rubio-Covarrubias et al., 2015).

En países donde la ocurrencia de la PMP es alta, los programas de mejoramiento han trabajado intensamente en el desarrollo de genotipos resistentes a esta enfermedad, aunque hasta la fecha no se ha liberado comercialmente ninguna variedad (Rubio-Covarrubias et al., 2017). Muchos estudios han reportado los efectos de las condiciones ambientales y de cultivo en la composición y calidad de los tubérculos (Hamouz, Cepl, & Dvorak, 2005; Hamouz, Lachman, Dvorak, Juzl, & Pivec, 2006; Leonel et al., 2017); sin embargo, hasta donde se sabe, todos se han llevado a cabo en regiones, o bajo condiciones experimentales, en las que la incidencia de PMP es inexistent. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la interacción genotipo-ambiente sobre las características fisicoquímicas de los tubérculos, y su influencia en el rendimiento, el color y la textura de las hojuelas fritas de papa.

## Materiales y métodos

### Genotipos de papa

Se evaluaron cuatro genotipos, incluyendo tres clones (Nau, 5-10, 99-39) y una variedad comercial (Fianna) (Cuadro 1).

### Condiciones experimentales de campo

Los genotipos se cultivaron en los ciclos primavera-verano de 2012 y 2013, en dos localidades: Metepec y Raíces, ambas ubicadas en el Estado de México, México. Metepec (19° 14' 35.39" de latitud norte, 99° 35' 27.82" de longitud oeste, a 2 600 m de altitud) presenta suelos del tipo franco-arenoso, pH 5.6 y 1.1 % de materia orgánica, además la incidencia de PMP en este lugar es alta (Rubio-Covarrubias et al., 2015). Por el contrario, en Raíces

**Table 1. Physical characteristics of potato genotypes.**

**Cuadro 1. Características físicas de los genotipos de papa.**

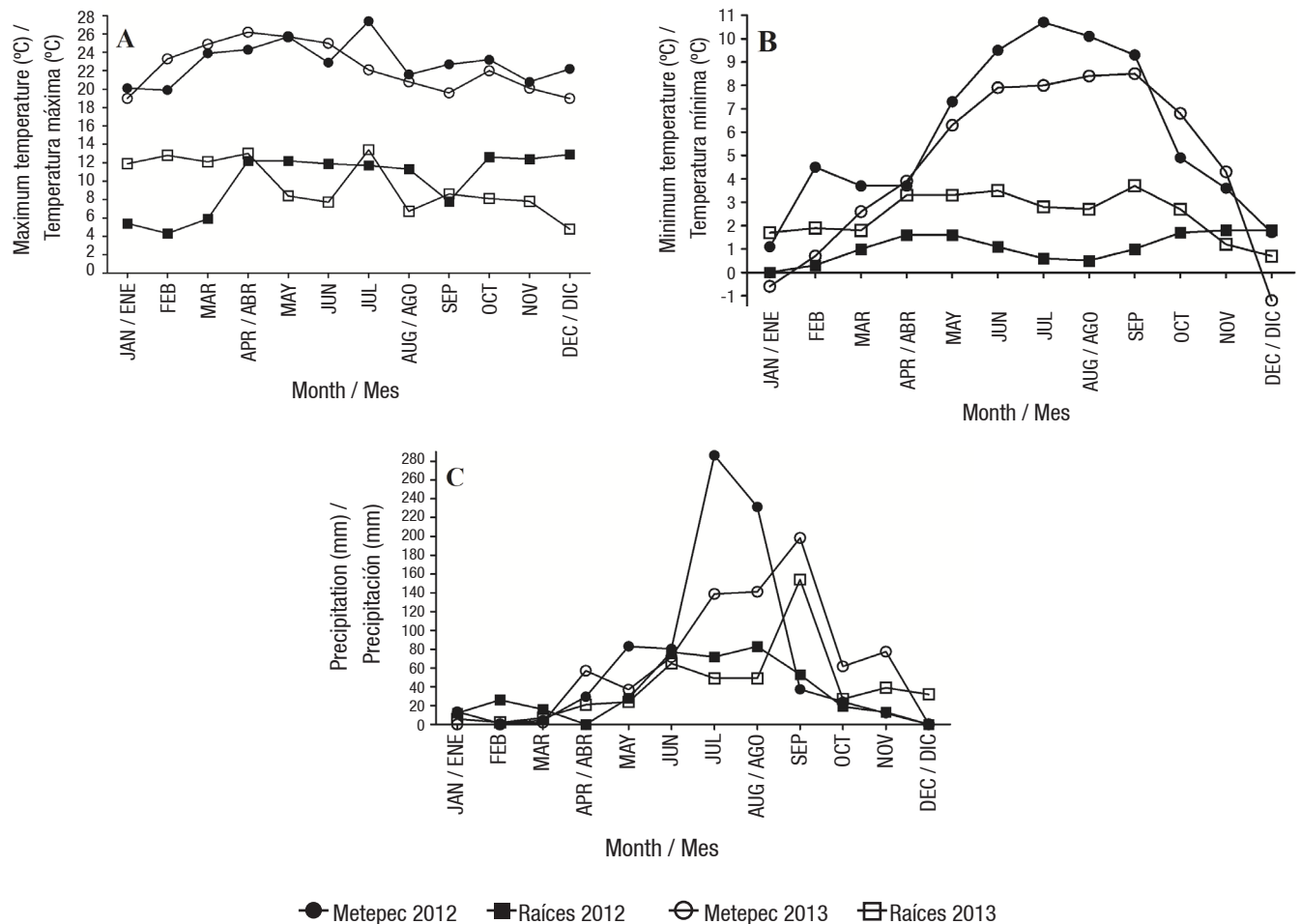
Genotype/ Genotipo	Maturity/ Madurez	Skin color/ Color de la piel	Flesh color/ Color de la pulpa
Fianna	Medium-late / Media-tardía	Yellow / Amarillo	Yellow / Amarillo
Nau	Early-medium / Temprana-media	Yellow / Amarillo	Cream / Crema
5-10	Early-medium / Temprana-media	Red / Rojo	Yellow / Amarillo
99-39	Late / Tardía	Yellow / Amarillo	Cream / Crema

furrows and 30 cm spacing between plants. Potatoes of each genotype were planted in a complete block design with four replications. In Raíces, in 2012, sowing took place on May 15, the desiccant was applied on September 21, and harvesting was conducted on October 15; on the other hand, in 2013, these activities occurred on May 20, September 23, and October 14. In Metepec, in 2012, these activities were performed on June 11, September 13, and October 4, while in 2013, they were carried out on June 11, September 12, and September 27, respectively. After harvesting, tubers were stored two days at room temperature (25 °C) until analysis.

Fertilization doses applied in Raíces were 200-300-200 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) kg·ha<sup>-1</sup>, plus 50 kg·ha<sup>-1</sup> of micronutrients, and 1 t·ha<sup>-1</sup> of chicken manure. In Metepec, the fertilization dosage was 200-200-200 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) kg·ha<sup>-1</sup>, plus 50 kg·ha<sup>-1</sup> of micronutrients, and 1 t·ha<sup>-1</sup> of chicken manure. Fungicides and pesticides were applied as required in order to control pests and diseases. The maximum and minimum temperatures, as well as the precipitation in each location is shown in Figure 1.

(19° 9' 59.78" latitud norte, 99° 47' 53.74" longitud oeste, a 3500 m de altitud) predominan los suelos tipo franco arcilloso, pH 5.1, alta capacidad de fijación de fósforo, 3.2 % de materia orgánica y nula incidencia de la PMP (Rubio-Covarrubias et al., 2013).

En ambos lugares, las papas se cultivaron conforme a la tecnología de la región (Rubio-Covarrubias et al., 2000). El cultivo se estableció en parcelas con dos surcos de 8 m de longitud, espacio de 90 cm entre surcos y 30 cm entre plantas. El diseño de siembra para cada genotipo fue en bloques completos con cuatro repeticiones. En Raíces, en 2012, la siembra se realizó el 15 de mayo, la aplicación del desecante el 21 de septiembre y la cosecha el 15 de octubre, y en 2013 dichas actividades se realizaron el 20 de mayo, el 23 de septiembre y el 14 de octubre, respectivamente. Mientras que en Metepec, en 2012, dichas actividades se llevaron a cabo el 11 de junio, el 13 de septiembre y el 4 de octubre, y en 2013 se realizaron el 11 de junio, el 12 de septiembre y el 27 de septiembre, respectivamente. En todos los casos, después de la cosecha los tubérculos se almacenaron



**Figure 1. Maximum (A) and minimum (B) temperatures as well as precipitation (C) in the locations under study. Figura 1. Temperaturas máximas (A) y mínimas (B), y precipitación (C) en las localidades bajo estudio.**



## Tuber physical properties

Ten tubers of each genotype were analyzed. Internal tuber discoloration was visually scored as reported by Rubio-Covarrubias et al. (2017). Each tuber was cut transversally and the degree of internal browning was graded on the scale from 0-5, where zero indicates no browning and 5 indicates a tuber with severe internal discoloration. Flesh color was evaluated in the cross-section of cut tubers in terms of luminosity ( $L^*$ ), hue, and chroma, using the MiniScan XE Plus colorimeter (Hunter Lab, USA) (Vázquez-Carrillo, Santiago-Ramos, Ybarra-Moncada, Rubio-Covarrubias, & Cadena-Hinojosa, 2013).

The SG was determined by the method described by Gould (1999). Solutions of NaCl (Merck, Germany), with SG between 1.040 and 1.140, were prepared with distilled water at 20 °C. Tubers were placed into 1 L of each solution, starting with the lowest density solution, and then they were moved successively to the following higher-density solution until the solution in which the tuber floated, when SG of this solution was considered the same as that of the tuber. Meanwhile, DM content was determined in triplicate by the difference in moisture content quantified by the method 44-15.02 of the AACC (2017).

## Content of starch, glucose, fructose and sucrose

Total starch content was determined in triplicate utilizing the Megazyme kit (Ireland), which is based on the method 76-13.01 of the AACC (2017).

The extraction and quantification of glucose, fructose, and sucrose were carried out following the enzyme-linked assay described by Castañeda-Saucedo et al. (2012). Soluble sugars were extracted from 1 g of tuber or a potato chip sample by six successive incubations of 10 min with ethanol (80 % v/v) at 70 °C. The extracts were evaporated at 50 °C, then re-suspended in distilled water and stored at -20 °C until analysis. Glucose, fructose, and sucrose were quantified in triplicate after the sequential addition of hexokinase (EC 2.7.1.1), phosphoglucose-isomerase (EC 5.3.1.9), and invertase (EC 3.2.1.26) from Sigma-Aldrich® (USA). Absorbances were measured in a Multiskan Ascent microplate reader (Lab Systems®, Canada) at 340 nm against standard curves of glucose, fructose, and sucrose from (Sigma-Aldrich®).

## Content of total phenols

The ultrasound assisted extraction method (Joaquín-Cruz et al., 2015) was employed. Ten grams of fresh whole potato tuber was put into a 125 mL Erlenmeyer flask and 30 mL of 80 % methanol were added. The sample was homogenized and sonicated (Branson 2510,

por dos días a temperatura ambiente (25 °C) hasta el análisis.

Las dosis de fertilización aplicadas en Raíces fueron 200-300-200 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O; kg·ha<sup>-1</sup>), 50 kg·ha<sup>-1</sup> de micronutrientes y 1 t·ha<sup>-1</sup> de gallinaza. En Metepec, las dosis de fertilización fueron iguales, a excepción del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, del que se aplicaron 200 kg·ha<sup>-1</sup>. Adicionalmente, se aplicaron fungicidas y pesticidas conforme a las necesidades, para controlar las plagas y enfermedades. En la Figura 1, se muestran las temperaturas máximas y mínimas, así como las precipitaciones de cada lugar.

## Propiedades físicas de los tubérculos

Las propiedades físicas se analizaron en diez tubérculos de cada genotipo. El manchado interno se determinó visualmente conforme a lo reportado por Rubio-Covarrubias et al. (2017); para ello, cada tubérculo se cortó transversalmente y el grado de manchado interno se clasificó en la escala de 0 a 5, donde 0 indica que no hay oscurecimiento y 5 que el tubérculo tiene un manchado interno severo. El color de la pulpa se evaluó en la sección transversal, de los tubérculos cortados previamente, en términos de luminosity ( $L^*$ ), tono y cromaticidad mediante un colorímetro MiniScan XE Plus (Hunter Lab, EUA) (Vázquez-Carrillo, Santiago-Ramos, Ybarra-Moncada, Rubio-Covarrubias, & Cadena-Hinojosa, 2013).

La GE se determinó por el método descrito por Gould (1999). Se prepararon soluciones de NaCl (Merck, Alemania), con GE entre 1.040 y 1.140, en agua destilada a 20 °C. Los tubérculos se colocaron en 1 L de solución, y se pasaron desde la solución de menor densidad hasta la solución en la que el tubérculo flotó, momento en que se consideró que la GE del tubérculo era la misma que la de la solución. Por su parte, el contenido de MS se determinó por triplicado, mediante la diferencia en el contenido de humedad cuantificada por el método 44-15.02 de la AACC (2017).

## Contenido de almidón, glucosa, fructosa y sacarosa

El contenido total de almidón se determinó por triplicado con el kit Megazyme (Irlanda), el cual se basa en el método 76-13.01 de la AACC (2017).

La extracción y cuantificación de glucosa, fructosa y sacarosa se realizaron mediante el ensayo ligado a enzimas descrito por Castañeda-Saucedo et al. (2012). Para ello, los azúcares solubles se extrajeron de 1 g de tubérculo, o de una muestra de hojuela de papa, mediante seis incubaciones sucesivas de 10 min con etanol (80 % v/v) a 70 °C. Posteriormente, los extractos se evaporaron a 50 °C, se volvieron a suspender en agua destilada y se almacenaron a -20 °C hasta el análisis. La

Marshall Scientific®, USA) for 30 min. This was then agitated for 90 min in a horizontal shaker at room temperature (25 °C) and under conditions of darkness. The sample was centrifuged at 2200 g for 15 min, then the supernatant was recovered, and the residue was re-extracted twice with 15 mL of a mixture of methanol:acetic acid:water (10:1:9 v/v/v). All of the supernatants were pooled, filtered and concentrated in a rotavapor (Rotavapor R-215, Buchi®, Switzerland) at 42 °C. Extracts were re-suspended in 5 mL of methanol 80 % (v/v) and stored in dark vials at 4 °C until analysis.

Quantification was performed in triplicate by the Folin-Ciocalteu (Singleton, Orthofer, and Lamuela-Raventós, 1999). An aliquot (100 µL) of the methanolic extract was mixed with 125 µL of Folin-Ciocalteu reagent and allowed to react for 6 min; then the reaction was neutralized by adding 1250 µL of 19 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solution and brought to 3 mL with distilled water. The sample was shaken and stored in darkness for 90 min. Absorbance was measured at 760 nm. Total soluble phenolics content was expressed as mg of chlorogenic acid·100 g<sup>-1</sup> sample.

#### Elaboration of potato chips

Potato chips were made as reported by Vázquez-Carrillo et al. (2013). Each tuber was sliced into 1.2 mm thick slices, which were fried for 3 min in vegetable oil at 180 °C in a domestic fryer (F100652, T-FAL®, China). Slices were placed on paper towels to absorb the excess oil.

#### Yield and physical properties of potato chips

Chip yield was calculated as a percentage by dividing the total weight of the potato chips obtained by the total weight of the tuber processed (Vázquez-Carrillo et al., 2013). Fracturability was evaluated using a texturometer (CT3 25k, Brookfield®, USA) with a spherical probe 1.27 cm in diameter and 3.5 cm in length, whose displacement was at 1 mm·s<sup>-1</sup> up to 3 mm distance. A potato chip slice was placed on a base with a central hole 2.5 cm in diameter. Ten potato chip slices were evaluated for each tuber (Vázquez-Carrillo et al., 2013). Chip color was assessed in triplicate with a Hunter Lab colorimeter as reported by Hasbún, Esquivel, Brenes, and Alfaro (2009).

#### Experimental design and statistical analysis

The experimental design was complete random blocks with four replicates. The treatment design was an asymmetric factorial 4x2x2: the first factor was the genotype (Fianna, Nau, 5-10, and 99-39), the second factor was the location (Metepec and Raíces), and the third factor was the year (2012 and 2013). The experimental unit consisted of 10 tubers. Results were analyzed by analysis of variance, and when significant differences were found a means comparison was

glucosa, la fructosa y la sacarosa se cuantificaron por triplicado tras la adición secuencial de hexoquinasa (EC 2.7.1.1), fosfoglucosa-isomerasa (EC 5.3.1.9) e invertasa (EC 3.2.1.26) de Sigma-Aldrich® (EUA). Las absorbancias se midieron en un lector de microplacas Multiskan Ascent (Lab Systems®, Canadá) a 340 nm frente a curvas estándar de cada azúcar Sigma-Aldrich®.

#### Contenido de fenoles totales

Para esta determinación, se empleó el método de extracción asistida por ultrasonido (Joaquín-Cruz et al., 2015). Se colocaron 10 g de tubérculo en un matraz Erlenmeyer de 125 mL y se agregaron 30 mL de metanol al 80 %; la muestra se homogenizó y sonicó (Branson 2510, Marshall Scientific®, EUA) durante 30 min. Posteriormente, se agitó durante 90 min en un agitador horizontal a temperatura ambiente (25 °C) y en condiciones de oscuridad. En seguida, la muestra se centrifugó a 2200 g durante 15 min, se recuperó el sobrenadante y el residuo se re-extrajo dos veces con 15 mL de una mezcla de metanol:ácido acético:agua (10:1:9 v/v/v). Todos los sobrenadantes se agruparon, filtraron y concentraron en un rotavapor (Rotavapor R-215, Buchi®, Suiza) a 42 °C. Los extractos se re-suspendieron en 5 mL de metanol al 80 % (v/v) y se almacenaron en frascos oscuros a 4 °C hasta el análisis.

La cuantificación se realizó por triplicado mediante el método Folin-Ciocalteu (Singleton, Orthofer, & Lamuela-Raventós, 1999). Se mezcló una alícuota (100 µL) del extracto metanólico con 125 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu y se dejó reaccionar durante 6 min; luego se neutralizó la reacción con 1250 µL de solución de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> al 19 % y se llevó a 3 mL con agua destilada. La muestra se agitó y se almacenó en la oscuridad durante 90 min. La absorbancia se midió a 760 nm, y el contenido de fenoles totales se expresó en mg de ácido clorogénico·100 g<sup>-1</sup> de muestra.

#### Elaboración de las hojuelas fritas de papa

Las hojuelas fritas de papa se hicieron conforme a lo reportado por Vázquez-Carrillo et al. (2013). Cada tubérculo se rebanó en rodajas de 1.2 mm de grosor y se frieron durante 3 min en aceite vegetal a 180 °C en una freidora doméstica (F100652, T-FAL®, China). Las rodajas se colocaron en toallas de papel para absorber el exceso de aceite.

#### Rendimiento y propiedades físicas de las hojuelas fritas de papa

El rendimiento de las hojuelas fritas se calculó como porcentaje, para lo cual se dividió el peso total obtenido de las hojuelas entre el peso total del tubérculo procesado (Vázquez-Carrillo et al., 2013). La

conducted by Tukey's test ( $P \leq 0.05$ ) using Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 2002).

## Results and discussion

### Physicochemical properties of potato tubers

Analysis of variance of the physicochemical properties of tubers showed significant effects ( $P \leq 0.05$ ) between genotypes (G), years (Y), and locations (E), except for chroma, in which no significant differences were found between locations (Table 2). All second-order and G x Y x E interactions were significant (Table 2).

These results indicated that there was an important effect of genetic variability among the genotypes, the climatic conditions in each year, and the altitude of each location, which influenced the prevalence of the ZC symptoms and the accumulation of carbohydrates.

In general, higher internal browning index (IBI) values were observed in 2013 (Table 3), indicating the presence of ZC disease. During this year, there was lower precipitation than in 2012 which could have influenced the ZC incidence. According to Rubio-Covarrubias et al. (2013), in the absence of rain, the population of the insect vector (*Bactericera cockerelli*) increases, resulting in a greater number of infected plants with tubers exhibiting greater internal browning.

In Raíces, no tubers had internal browning as expected (Table 3), and these results may be attributed to the altitude and temperatures. Rubio-Covarrubias et al. (2011) reported that the population of the insect vector and ZC disease decrease as the altitude increases; therefore, at an altitude higher than 3200 m,

fracturabilidad se evaluó con un texturómetro (CT3 25k, Brookfield®, EUA) con una sonda esférica de 1.27 cm de diámetro, 3.5 cm de longitud y desplazamiento de  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta una distancia de 3 mm. Se colocó una hojuela sobre una base con un agujero central de 2.5 cm de diámetro. Se evaluaron diez hojuelas por cada tubérculo (Vázquez-Carrillo et al., 2013). Por su parte, el color de las hojuelas se evaluó por triplicado con un colorímetro conforme a lo reportado por Hasbún, Esquivel, Brenes, y Alfaro (2009).

### Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, y el diseño de tratamientos fue un factorial asimétrico 4x2x2: el primer factor fue el genotipo (Fianna, Nau, 5-10 y 99-39), el segundo factor fue la ubicación (Metepec y Raíces) y el tercer factor fue el año (2012 y 2013). La unidad experimental constó de 10 tubérculos. Los resultados se examinaron mediante un análisis de varianza, y cuando se encontraron diferencias significativas se realizó una comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) por medio del programa *Statistical Analysis System* (SAS Institute Inc., 2002).

## Resultados y discusión

### Propiedades fisicoquímicas de los tubérculos

El análisis de la varianza de las propiedades fisicoquímicas de los tubérculos mostró efectos significativos ( $P \leq 0.05$ ) entre genotipos (G), años (Y) y localidades (E), aunque en este último no fue significativa la cromaticidad (Cuadro 2). Todas las interacciones de segundo orden y la interacción de los factores (G x Y x E) fueron significativas (Cuadro 2).

**Table 2. Analysis of variance of physicochemical parameters of potato tubers.**

**Cuadro 2. Análisis de varianza de los parámetros fisicoquímicos de los tubérculos de papa.**

SV <sup>1</sup> /FV <sup>1</sup>	DF/ GL	IBI/ IMI	Color			Total phenolics/ Fenoles totales	SG/ GE	DM/ MS	Starch/ Almidón	RS/ AR	TS/ AT
			L*	Hue/ Tono	Chroma/ Croma						
Genotype (G)/ Genotipo (G)	3	1.69**	7.70**	221.41**	270.67**	8184.69**	0.01**	11.41**	17.24**	0.36**	0.32**
Year (Y)/ Año (Y)	1	0.15**	21.50**	565.82**	0.25*	81810.12**	0.01**	8.51**	4.20**	0.56**	0.52**
G x Y	3	0.02**	12.90**	160.88**	3.01**	14504.00**	0.01**	3.84**	0.94**	0.13**	0.23**
Location (E)/ Localidad (E)	1	20.80**	34.71**	673.81**	0.01	206146.20**	0.01**	58.05**	43.24**	1.11**	2.13**
G x E	3	1.69**	6.23**	197.96**	7.55**	11158.72**	0.01**	10.96**	16.73**	0.05**	0.11**
Y x E	1	0.15**	0.83**	415.30**	34.84**	232.20*	0.01**	14.18**	2.31**	0.75**	1.31**
G x Y x E	3	0.02**	4.42**	145.78**	1.90**	1208.74**	0.01**	2.95**	3.35**	0.26**	0.39**

<sup>1</sup>SV = source of variation; DF = degrees of freedom; IBI = internal browning index; L\* = luminosity; SG = specific gravity; DM = dry matter; RS = reducing sugars (glucose + fructose); TS = total sugars (RS + sucrose). \* =  $P \leq 0.05$ ; \*\* =  $P \leq 0.01$ .

<sup>1</sup>FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; IMI = índice de manchado interno; L\* = luminosidad; GE = gravedad específica; MS = materia seca; AR = azúcares reductores (glucosa + fructosa); AT = azúcares totales (AR + sacarosa). \* =  $P \leq 0.05$ ; \*\* =  $P \leq 0.01$ .

**Table 3. Mean comparisons of quality parameters of potato tubers grown in central Mexico.****Cuadro 3. Comparación de medias de los parámetros de calidad de tubérculos de papa cultivados en el centro de México.**

Factor	IBI <sup>1</sup> / IMI <sup>1</sup>	Flesh color/Color de la pulpa			Total phenolics (mg·100 g <sup>-1</sup> fresh tuber)/ Fenoles totales (mg·100 g <sup>-1</sup> tubérculo fresco)	SG/ GE	DM/ MS	Starch/ Almidón	RS/ AR	TS/ AT	
		L*	Hue/ Tono	Chroma/ Croma							(g·100 g <sup>-1</sup> fresh tuber)/ (g·100 g <sup>-1</sup> tubérculo fresco)
Year/ Año	2012	0.74 b <sup>2</sup>	78.02 b	88.91 a	28.55 a	248.59 b	1.084 b	20.35 a	16.14 a	0.221 b	0.449 b
	2013	0.87 a	79.66 a	80.50 b	28.72 b	349.72 a	1.074 a	19.32 b	15.42 b	0.485 a	0.704 a
Genotype/ Genotipo	Fianna	1.35 a	78.22 b	76.94 b	26.98 b	266.99 d	1.085 a	21.04 a	16.96 a	0.282 b	0.556 b
	Nau	0.42 c	80.31 a	88.10 a	26.46 c	288.81 c	1.075 b	19.02 b	14.32 b	0.235 c	0.380 d
	5-10	0.42 c	78.42 b	87.80 a	37.13 a	297.79 b	1.084 a	20.66 a	17.12 a	0.226 c	0.517 c
	99-39	1.02 b	78.42 b	85.99 a	23.97 d	343.04 a	1.072 b	18.61 b	14.71 b	0.671 a	0.852 a
Location/ Localidad	Raíces	0.00 b	79.88 a	89.29 a	28.61 b	218.89 b	1.083 a	21.18 a	16.94 a	0.167 b	0.318 b
	Meteppec	1.61 a	77.80 b	80.12 b	28.66 a	379.42 a	1.075 b	18.49 b	14.62 b	0.539 a	0.835 a

<sup>1</sup>IBI = internal browning index; L\* = luminosity; SG = specific gravity; DM = dry matter content; RS = reducing sugars (glucose +fructose); TS = total sugars (RS + sucrose). <sup>2</sup>Means with the same letters within each column and between the levels of each factor do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

<sup>1</sup>IMI = índice de manchado interno; L\* = luminosidad; GE = gravedad específica; MS = contenido de materia seca; AR = azúcares reductores (glucosa +fructosa); AT = azúcares totales (AR + sacarosa). <sup>2</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna y entre niveles de cada factor no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

no significant problems related to ZC have been reported because the low temperatures did not allow the development of the insect vector or reduce its population.

Among genotypes, commercial variety Fianna had the highest values of IBI compared with the clones (Table 3), while clones Nau and 5-10 showed some resistance to internal browning (Table 3). Resistance to ZC disease of clones Nau and 5-10, as well as the susceptibility of Fianna and 99-39 to internal browning has been reported by Rubio-Covarrubias et al. (2013).

Phenolics are important compounds in potatoes because they are associated with the color of the fresh and processed tubers. When tubers are cut, these compounds oxidize and convert into melanins, which enhances the enzymatic browning (Álvarez-Torres & Canet-Parreño, 2009). Total phenolics ranged from 218.89-379.46 mg·100 g<sup>-1</sup> fresh tuber (Table 3), similar to values reported by Bradshaw and Ramsay (2009).

Tubers harvested in 2013, and in Meteppec, had the highest phenolics content (Table 3), the same trend as shown in the IBI. In fact, the correlation between these variables was positive ( $r = 0.57$ ,  $P \leq 0.01$ ), and this effect is because both factors are symptoms of ZC disease. Wallis et al. (2014) mention that the accumulation of phenols is a defense mechanism against ZC disease. Among genotypes, the highest content of phenolics was found in clone 99-39, which also had a higher IBI, meaning that this genotype is not resistant to ZC disease and that it expresses a higher accumulation of these compounds when infected. Clone 5-10, considered as resistant to ZC disease, had a higher total phenolics content; however,

Los resultados indicaron que hubo un efecto importante de la variabilidad genética entre los genotipos, las condiciones climáticas de cada año y la altitud de cada lugar, lo cual influyó en la prevalencia de los síntomas de la PMP y la acumulación de carbohidratos.

En general, en 2013 se observaron valores más altos del índice de manchado interno (IMI) (Cuadro 3), lo cual indica la presencia de la PMP. Además, durante este año las precipitaciones fueron menores que en 2012, lo cual podría haber influido en la incidencia de esta enfermedad. De acuerdo con Rubio-Covarrubias et al. (2013), en ausencia de lluvia la población del insecto vector (*Bactericera cockerelli*) aumenta, lo que incrementa el número de plantas y el manchado interno.

En Raíces, ningún tubérculo tuvo el manchado interno como se esperaba (Cuadro 3), lo que se puede atribuir a la altitud y la temperatura. Rubio-Covarrubias et al. (2011) reportan que la población del insecto vector y la PMP disminuyen a medida que la altitud aumenta; por lo que a 3200 m de altitud no se reportaron problemas significativos relacionados con la PMP, debido a que las bajas temperaturas no permitieron el desarrollo del insecto vector, o bien, redujeron su población.

Entre los genotipos, la variedad comercial Fianna presentó los valores más altos de IMI (Cuadro 3), mientras que los clones Nau y 5-10 mostraron cierta resistencia al manchado interno (Cuadro 3). La resistencia de estos clones a la PMP, así como la susceptibilidad de Fianna y 99-39 al manchado interno ha sido reportada por Rubio-Covarrubias et al. (2013).



this effect could be due to the presence of anthocyanins, in that its tubers have a red skin (Table 1).

The combination of luminosity ( $L^*$ ), hue, and chroma defined the flesh color. Tubers harvested in 2012, and in Raíces, had clear yellowish flesh, while tubers harvested in 2013, and in Metepec, had flesh with intense yellow-to-orange color. Between genotypes, clones had a yellowish and more whitish flesh than Fianna, and clone 5-10 had the best color (clear yellowish). Flesh color depended mainly on two factors: the IBI and the enzymatic browning produced by oxidation of phenolics, a relation demonstrated by the negative correlations between  $L^*$  and IBI ( $r = -0.50$ ,  $P \leq 0.01$ ), hue and IBI ( $r = -0.66$ ,  $P \leq 0.01$ ), and between  $L^*$  and total phenolics ( $r = -0.43$ ,  $P \leq 0.05$ ).

Clones Nau and 5-10 had clear yellowish flesh independent of location or the year during which they were grown. In contrast, the Fianna variety exhibited tones ranging from clear yellowish to intense red. Clone Nau present the same behavior in both flesh color and total phenolics, reaffirming that both variables are principally attributable to the genetic component that provides ZC resistance.

SG is determined by the DM content, which is approximately 80 % starch (Stark & Love, 2003). This relationship was demonstrated by the positive correlations found between SG and DM ( $r = 0.66$ ,  $P \leq 0.01$ ), SG and starch ( $r = 0.63$ ,  $P \leq 0.01$ ), and between DM and starch ( $r = 0.93$ ,  $P \leq 0.01$ ), and these correlations were similar to those reported by Vázquez-Carrillo et al. (2013). The SG, DM, and starch content were higher in tubers grown in 2012, and in Raíces, as well as in the genotypes: Fianna and clone 5-10 (Table 3). The main factors influencing these results were temperature, incidence of ZC, and the maturity of the genotypes.

According to Álvarez-Torres and Canet-Parreño (2009), at lower temperatures, such as those presented in Raíces in both years, the respiration rate is lower than the photosynthesis rate, which increases the accumulation of carbohydrates in the tubers; thus, the SG increases. Additionally, in Raíces, the life cycle was one month longer than in Metepec due to lower temperatures; therefore, plants carried out photosynthesis for a longer time and accumulated a higher starch content. On the other hand, the null ZC incidence of Raíces contributed to the accumulation of starch because the foliage was not damaged.

The genetic influence also played an important role in these results because it was observed that clone 5-10 did not reveal a differentiated response by the effect of the interaction of the remaining factors, that is, accumulation of DM and the SG were similar in all of the assessed environments. The same behavior

Por otro lado, los compuesto fenólicos son importantes en la papa porque están asociados con el color de los tubérculos frescos y procesados. Cuando los tubérculos se cortan, dichos compuestos se oxidan y se convierten en melaninas, lo cual favorece el pardeamiento enzimático (Álvarez-Torres & Canet-Parreño, 2009). Los fenoles totales oscilaron entre 218.89 y 379.46 mg·100 g<sup>-1</sup> de tubérculo fresco (Cuadro 3); valores similares a los reportados por Bradshaw y Ramsay (2009).

Los tubérculos cosechados en 2013, y en Metepec, tuvieron el mayor contenido de fenoles (Cuadro 3), la misma tendencia que se muestra en el IMI; de hecho, la correlación entre estas variables fue positiva ( $r = 0.57$ ,  $P \leq 0.01$ ), lo que se debe a que ambos factores son síntomas de la PMP. En este sentido, Wallis et al. (2014) mencionan que la acumulación de fenoles es un mecanismo de defensa contra la PMP. Entre los genotipos, el mayor contenido fenólico se encontró en el clon 99-39, que también tenía un IMI alto; lo anterior indica que este genotipo no es resistente a la PMP y que expresa una mayor acumulación de estos compuestos cuando se infecta. Sin embargo, el clon 5-10, considerado como resistente a dicha enfermedad, presentó un alto contenido de compuestos fenólicos, lo que podría deberse a la presencia de antocianinas, ya que sus tubérculos tienen la piel roja (Cuadro 1).

La combinación de luminosidad ( $L^*$ ), tono y cromaticidad definió el color de la pulpa. Los tubérculos cosechados en 2012, y en Raíces, presentaron pulpa amarillo claro, mientras que los cosechados en 2013, y en Metepec, tuvieron pulpa de color amarillo intenso a naranja. Entre los genotipos, los clones tuvieron pulpa amarillenta y más blanquecina que Fianna, y el 5-10 mostró el mejor color (amarillo claro). Dicho color dependió principalmente de dos factores: el IMI y el oscurecimiento enzimático producido por la oxidación de los compuestos fenólicos; esta relación se demostró por las correlaciones negativas entre  $L^*$  e IMI ( $r = -0.50$ ,  $P \leq 0.01$ ),  $L^*$  y fenoles totales ( $r = -0.43$ ,  $P \leq 0.05$ ) y entre tono e IMI ( $r = -0.66$ ,  $P \leq 0.01$ ).

Los clones Nau y 5-10 presentaron una pulpa amarillo claro, independientemente de la localidad o del año en que se cultivaron. En contraste, la variedad Fianna presentó tonos que oscilaron desde el amarillo claro al rojo intenso. El clon Nau presentó un comportamiento similar, tanto en color de la pulpa como en fenoles totales, lo que reafirma que ambas variables son atribuibles, principalmente, al componente genético que proporciona la resistencia a la PMP.

En cuanto a la GE, se sabe que está determinada por el contenido de MS, el cual es aproximadamente 80 % almidón (Stark & Love, 2003). Esta relación se demostró por las correlaciones positivas entre GE y MS ( $r = 0.66$ ,  $P \leq 0.01$ ), GE y almidón ( $r = 0.63$ ,  $P \leq 0.01$ ), y entre MS y

was observed in the starch content of the clone Nau, although the other DM components, such as protein, lipids, or minerals, could have been affected by the environment; therefore, these changes modified its SG.

Tubers used in the production of chips and French fries must have a DM content higher than 20 %, a starch content higher than 13 %, and SG higher than 1.08 (Stark & Love, 2003); thus, only the Fianna variety and clone 5-10 grown in Raíces were suitable for processing.

Total sugars (TS) content ranged from 0.318 to 0.852 % and reducing sugars (RS) from 0.167 to 0.671 % (Table 3); similar values were reported by Bradshaw and Ramsay (2009) and Hasbún et al. (2009). Tubers grown in Metepec, and in 2013, had the highest content of TS and RS (Table 3). These results are explained by the incidence of ZC. Wallis et al. (2014) reported that tubers infected by ZC disease accumulated higher amounts of RS than healthy tubers as a consequence of the metabolic disorders caused by the causal agent.

Differences among genotypes could also be defined by their genetic code, which determines their metabolism; therefore, clones 5-10 and Nau had lower concentrations of RS and TS than Fianna and clone 99-39 (Table 3). These results could be related with their maturity; clones 5-10 and Nau have early-medium maturity which could influence positively in a lower sugars accumulation. Only tubers from Fianna and clone 5-10 grown in Raíces, in both years (data not shown), had an acceptable quality for chip processing, since tubers for this purpose must have a RS and a sucrose content lower than 0.035 and 0.15 % of fresh tuber, because higher contents give rise to some problems of browning and acrylamide production (Álvarez-Torres & Canet-Parreño, 2009; Stark & Love, 2003).

almidón ( $r = 0.93, P \leq 0.01$ ), además, estas correlaciones son similares a las reportadas por Vázquez-Carrillo et al. (2013). La GE, el contenido de almidón y la MS fueron mayores en los tubérculos cultivados en 2012 y en Raíces, así como en los genotipos: Fianna y el clon 5-10 (Cuadro 3). Los principales factores que influyeron en estos resultados fueron la temperatura, la incidencia de la PMP y la madurez de los genotipos.

De acuerdo con Álvarez-Torres y Canet-Parreño (2009), a temperaturas más bajas, como las que se presentaron en Raíces en ambos años, la tasa de respiración es inferior a la tasa de fotosíntesis, lo cual aumenta la acumulación de carbohidratos en los tubérculos; por ende, la GE aumenta. Adicionalmente, en Raíces, el ciclo de cultivo fue un mes más largo que en Metepec debido a las temperaturas más bajas; por lo tanto, las plantas realizaron la fotosíntesis durante más tiempo y acumularon más almidón. Por otro lado, la nula incidencia de la PMP en Raíces contribuyó a la acumulación de almidón, debido a que el follaje no se dañó.

En estos resultados se observó nuevamente la influencia genética, ya que el clon 5-10 no reveló una respuesta diferenciada por efecto de la interacción de los factores restantes; es decir, la acumulación de MS y la GE fue similar en todos los ambientes evaluados. Este mismo comportamiento se observó en el contenido de almidón del clon Nau, aunque los otros componentes de la MS, como proteínas, lípidos o minerales, podrían haber sido afectados por el ambiente; por lo que, estos cambios pudieron haber modificado su GE.

Por otra parte, los tubérculos utilizados en la producción de hojuelas fritas y papas en bastón deben tener un contenido de MS superior a 20 %, un contenido de almidón superior a 13 % y una GE superior a 1.08 (Stark

**Table 4. Analysis of variance of physicochemical parameters of potato chips.**

**Cuadro 4. Análisis de varianza de los parámetros fisicoquímicos de las hojuelas fritas de papa.**

SV <sup>1</sup> /FV <sup>1</sup>	DF/ GL	Chip yield/ Rendimiento de hojuela	Chip color/ Color de las hojuelas			Fracturability/ Fracturabilidad	Total phenolics/ Fenoles totales	RS/ AR	TS/ AT
			L*	Hue/ Tono	Chroma/ Croma				
Genotype (G)/ Genotipo (G)	3	27.04**	501.63**	271.65**	71.47**	1.29**	45168.47**	5.34**	7.13**
Year (Y)/ Año (Y)	1	10.01**	380.33**	736.13**	98.21**	2.53**	21835.27**	3.24**	15.05**
G x Y	3	9.85**	160.45**	44.54**	18.81**	0.58**	15654.02**	3.51**	7.74**
Location (E)/ Localidad (E)	1	1.95**	199.20**	129.12**	6.62**	2.42**	148771.49**	10.01**	22.59**
G x E	3	7.91**	57.91**	38.68**	7.72**	0.49**	36700.84**	2.87**	4.47**
Y x E	1	1.09**	10.15**	4.90**	30.50**	1.36**	24337.69**	4.67**	12.63**
G x Y x E	3	2.56**	28.59**	10.46**	7.44**	0.52**	32766.57**	4.44**	8.02**

<sup>1</sup>SV = source of variation; DF = degrees of freedom; L\* = luminosity; RS = reducing sugars (glucose + fructose); TS = total sugars (RS + sucrose). \* =  $P \leq 0.05$ ; \*\* =  $P \leq 0.01$ .

<sup>1</sup>FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; L\* = luminosidad; AR = azúcares reductores (glucosa + fructosa); AT = azúcares totales (AR + sacarosa). \* =  $P \leq 0.05$ ; \*\* =  $P \leq 0.01$ .

## Physicochemical properties of potato chips

Analysis of variance demonstrated highly significant effects ( $P \leq 0.01$ ) in all variables due to the effect of each factor and the interactions among them (Table 4).

The yield and texture of potato chips depend greatly on tuber density (Pedreschi, 2009). This relationship was confirmed by the positive correlations found between chip yield and SG ( $r = 0.37$ ,  $P \leq 0.05$ ), chip yield and DM ( $r = 0.60$ ,  $P \leq 0.001$ ), chip yield and starch ( $r = 0.67$ ,  $P \leq 0.001$ ), and DM and fracturability ( $r = 0.37$ ,  $P \leq 0.05$ ). Tubers grown in 2012, and in Raíces, as well as tubers with SG > 1.080 and higher DM and starch content gave higher chip yield (Table 5).

The texture of potato chips is a very important quality attribute and this variable in terms of fracturability ranged from 2.8-3.7 N (Table 5), similar values to those reported by Vázquez-Carrillo et al. (2013). Since the correlation coefficient between DM and fracturability was low, it could be inferred that not only DM components such as starch influenced chip texture, but also the composition and structure of the cell wall, especially the presence of pectic substances; however, more research is needed on this aspect.

Potato chips with the best yellowish color (higher values of  $L^*$ , hue, and chroma) were produced from tubers grown in 2012, in Raíces, and from clone 5-10, as expected (Table 5). The inverse trend was observed in

& Love, 2003); por lo tanto, sólo la variedad Fianna y el clon 5-10 cultivados en Raíces fueron adecuados para el procesamiento.

El contenido total de azúcares (AT) osciló entre 0.318 y 0.852 %, y el de azúcares reductores (AR) entre 0.167 y 0.671 % (Cuadro 3); valores similares a los reportados por Bradshaw y Ramsay (2009) y Hasbún et al. (2009). Los tubérculos cultivados en Metepec, y en 2013, tuvieron el mayor contenido de AT y AR (Cuadro 3), lo que se explica por la incidencia de la PMP. Wallis et al. (2014) reportaron que los tubérculos infectados con dicha enfermedad acumularon mayores cantidades de AR que los tubérculos sanos, esto como consecuencia de los trastornos metabólicos ocasionados por el agente causal.

Las diferencias entre genotipos también podrían definirse por su código genético, el cual determina su metabolismo; por ello, los clones 5-10 y Nau presentaron concentraciones más bajas de AR y AT que Fianna y el clon 99-39 (Cuadro 3). Estos resultados podrían estar relacionados con su madurez; ya que los clones 5-10 y Nau tienen una madurez temprana-media que podría influir en una menor acumulación de azúcares. Por lo anterior, sólo los tubérculos de Fianna y el clon 5-10 cultivados en Raíces, en ambos años (datos no mostrados), tuvieron una calidad aceptable para el procesamiento en hojuelas fritas, ya que los tubérculos para este fin deben tener contenidos de AR y sacarosa inferiores a 0.035 y 0.15 % del tubérculo fresco, respectivamente; contenidos más altos originan

**Table 5. Mean comparisons for the physicochemical characteristics of potato chips from four genotypes grown in Central Mexico.**

**Cuadro 5. Comparación de medias de las propiedades fisicoquímicas de hojuelas fritas de papa de cuatro genotipos cultivados en el centro de México.**

Factor	Year / Año	Chip yield (g·100 g <sup>-1</sup> fresh tuber) / Rendimiento de hojuela (g·100 g <sup>-1</sup> tubérculo fresco)	Chip color			Fracturability (N) / Fracturabilidad (N)	Phenolics (mg·100 g dry mater <sup>-1</sup> ) / Fenólicos (mg·100 g <sup>-1</sup> materia seca)	RS <sup>1</sup> / AR <sup>1</sup>	TS / AT
			L*	Hue	Chroma				
	2012	26.1 a <sup>2</sup>	60.27 a	79.67 a	33.42 b	3.6 a	207.18 a	0.448 b	0.938 b
	2013	25.0 b	53.38 b	70.07 b	36.42 a	3.0 b	154.94 b	1.084 a	2.310 a
Genotype / Genotipo	Fianna	26.7 b	60.00 b	76.39 b	33.26 b	3.4 b	211.49 a	0.424 b	1.141 c
	Nau	24.8 c	59.00 b	76.21 b	34.01 b	3.7 a	163.76 c	0.236 c	0.862 d
	5-10	27.3 a	63.09 a	80.28 a	39.63 a	2.8 c	86.10 d	0.418 b	1.510 b
	99-39	23.3 d	45.24 c	66.60 c	33.78 b	3.4 b	262.89 a	1.984 a	2.984 a
Location / Localidad	Raíces	25.8 a	59.32 a	76.88 a	35.62 a	3.6 a	112.87 b	0.206 b	0.784 b
	Metepec	25.3 b	54.33 b	72.86 b	34.71 b	3.0 b	249.24 a	1.325 a	2.464 a

<sup>1</sup>RS = reducing sugars (glucose + fructose); TS = total sugars (RS + sucrose); L\* = luminosity. <sup>2</sup>Means with the same letters within each column and between the levels of each factor do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

<sup>1</sup>AR = azúcares reductores (glucosa + fructosa); AT = azúcares totales (AR + sacarosa); L\* = luminosidad. <sup>2</sup>Medias con la misma letra dentro de cada columna y entre niveles de cada factor no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

potato chips from clone 99-39, which were dark brown in color. Several compounds influence potato chip color, including RS, sucrose, ascorbic acid, chlorogenic acid, glutamine, lysine, glycine, and arginine (Rodríguez-Saona & Wrolstad, 1997). Luminosity and hue were well correlated with the RS content of fresh tubers ( $r = -0.67$  and  $r = -0.68$ , respectively,  $P \leq 0.001$ ), as well as with total phenolics of fresh tuber ( $r = -0.65$ ,  $P \leq 0.001$  and  $r = -0.66$ , respectively,  $P \leq 0.01$ ), meaning that the higher content of RS and total phenolics in fresh tuber enhanced the non-enzymatic browning of potato chips. For this reason, clone 99-39 had dark-brown potato chips, while clone 5-10 had clear yellowish potato chips.

Total phenolics in potato chips ranged from 14.5 and 532.5 mg·100 g<sup>-1</sup> (Table 5). The loss of these compounds ranged from 60.4 to 98.4 % with respect to fresh tubers. Higher losses were recorded in tubers from genotypes with lower contents. Kalkan and Yücecan (2013) indicated that losses of phenolics after frying ranged from 20 to 76 % and the main compound lost is chlorogenic acid.

The RS and TS contents decreased with respect to tuber content, and part of these sugars were utilized in the non-enzymatic browning reactions giving the color of potato chips. Our values (Table 5) were similar to those observed by Roe, Church, Pinchen, and Finglas (2013), who reported values ranging from 0.3 to 1.5 g·100 g<sup>-1</sup> of TS in potato chips obtained by means of several frying methods.

## Conclusions

Differences between years, and among locations and genotypes, as well as the interaction among all of the factors influenced the quality of tubers and potato chips. Precipitation, altitude, temperature, and the resistance of the genotypes influenced the zebra chip disease symptoms. Thus, the highest precipitation, lowest temperatures, and the use of resistant genotypes led to the production of tubers with the lowest internal browning and highest starch and dry matter content, as well as the lowest reducing sugars and phenolics content. These conditions allowed obtaining suitable tubers for chip processing, giving chips with acceptable color and texture. Clone 5-10 grown in Raíces in both years had the best physicochemical characteristics for fresh consumption and chip processing.

algunos problemas de pardeamiento y de producción de acrilamida (Álvarez-Torres & Canet-Parreño, 2009; Stark & Love, 2003).

## Propiedades fisicoquímicas de las hojuelas

El análisis de varianza demostró efectos altamente significativos ( $P \leq 0.01$ ) en todas las variables debido a los factores y su interacciones (Cuadro 4).

El rendimiento y la textura de las hojuelas fritas de papa dependen en gran medida de la densidad del tubérculo (Pedreschi, 2009). Esta relación se confirmó por las correlaciones positivas entre el rendimiento de las hojuelas y la GE ( $r = 0.37$ ,  $P \leq 0.05$ ), el rendimiento de las hojuelas y la MS ( $r = 0.60$ ,  $P \leq 0.001$ ), el rendimiento de las hojuelas y el almidón ( $r = 0.67$ ,  $P \leq 0.001$ ), y entre la MS y la fracturabilidad ( $r = 0.37$ ,  $P \leq 0.05$ ). Los tubérculos cultivados en 2012, y en Raíces, así como los que tenían GE > 1.080, mayor contenido de almidón y de MS, ofrecieron mayor rendimiento de hojuela (Cuadro 5).

La textura de las hojuelas fritas de papa es un atributo de calidad muy importante, y se determinó a través de la fracturabilidad, la cual osciló entre 2.8 y 3.7 N (Cuadro 5), valores similares a los reportados por Vázquez-Carrillo et al. (2013). Dado que el coeficiente de correlación entre MS y fracturabilidad fue bajo, se podría inferir que no sólo los componentes de la MS, como el almidón, influyeron en la textura de las hojuelas, sino también la composición y estructura de la pared celular, especialmente la presencia de pectinas; sin embargo, se necesita más investigación al respecto.

Las hojuelas de papa frita con el mejor color amarillento (valores más altos de L\*, tono y cromaticidad) se produjeron a partir de tubérculos cultivados en 2012, en Raíces y del clon 5-10, como era de esperarse (Cuadro 5). La tendencia opuesta se observó en las hojuelas fritas del clon 99-39, las cuales fueron de color café oscuro. En este sentido, se sabe que muchos compuestos influyen en el color de las hojuelas fritas de papa, incluyendo AR, sacarosa, ácido ascórbico, ácido clorogénico, glutamina, lisina, glicina y arginina (Rodríguez-Saona & Wrolstad, 1997). La luminosidad y el tono estuvieron correlacionados con el contenido de AR de los tubérculos frescos ( $r = -0.67$  y  $r = -0.68$ , respectivamente,  $P \leq 0.001$ ), así como con los fenoles totales ( $r = -0.65$ ,  $P \leq 0.001$  y  $r = -0.66$ ,  $P \leq 0.01$ , respectivamente). Lo anterior significa que el contenido más alto de AR y de fenoles totales en los tubérculos frescos realza el oscurecimiento no enzimático de las hojuelas de papa. Por esta razón, el clon 99-39 tuvo hojuelas café oscuro, mientras que el clon 5-10 tuvo hojuelas amarillo claro.

Los fenoles totales en las hojuelas osciló entre 14.5 y 532.5 mg·100 g<sup>-1</sup> materia seca (Cuadro 5), y la pérdida de

*End of English version*



## References / Referencias

- AACC International. (2017). *Approved methods of analysis: Method 44-15.02. Moisture-air-oven methods: Method 46-16. 01. Total starch assay procedure (Megazyme amyloglucosidase/ $\alpha$ -amylase method)*. St. Paul: Author.
- Álvarez-Torres, M. D., & Canet-Parreño, W. (2009). Thermal processing and quality optimization. In: Singh, J., & Kaur, L. (Eds.), *Advances in potato chemistry and technology* (pp. 163-219). Burlington: Academic Press Inc. (London) Limited. doi: 10.1016/B978-0-12-374349-7.00007-6
- Bradshaw, J. E., & Ramsay, G. (2009). Potato origin and production. In: Singh, J., & Kaur, L. (Eds.), *Advances in potato chemistry and technology* (pp. 1-26). Burlington: Academic Press Inc. (London) Limited. doi: 10.1016/B978-0-12-374349-7.00001-5
- Castañeda-Saucedo, M. C., Delgado-Alvarado, A., Córdova-Téllez, L., González-Hernández, V. A., Tapia-Campos, E., Santacruz-Varela, A., Vázquez-Carrillo, M. G., & García-de los Santos, G. (2012). Changes in carbohydrate concentration in leaves, pods and seeds of dry bean plants under drought stress. *Interciencia*, 37(3), 168-175. Retrieved from <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/168-CASTA%C3%91EDA-8.pdf>
- Gould, W. A. (1999). *Potato production, processing & technology*. Maryland, USA: CTI Publications, Inc.
- Hamouz, K., Cepl, J., & Dvorak, P. (2005). Influence of environmental conditions on the quality of potato tubers. *Horticultural Science*, 32(3), 89-95. doi: 10.17221/3771-HORTSCI
- Hamouz, K., Lachman, J., Dvorak, P., Juzl, M., & Pivec, V. (2006). The effect of site conditions, variety and fertilization on the content of polyphenols in potato tubers. *Plant, Soil and Environment*, 52(9), 407-412. doi: 10.17221/3459-PSE
- Hasbún, J., Esquivel, P., Brenes, A., & Alfaro, I. (2009). Propiedades físico-químicas y parámetros de calidad para uso industrial de cuatro variedades de papa. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 77-89. Retrieved from <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6736/6424>
- Joaquín-Cruz, E., Dueñas, M., García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., Santos-Buelga, C., & García-Salinas, C. (2015). Anthocyanin and phenolic characterization, chemical composition and antioxidant activity of chagalapoli (*Ardisia compressa* K.) fruit: A tropical source of natural pigments. *Food Research International*, 70, 151-157. doi: 10.1016/j.foodres.2015.01.033
- Kalkan, I., & Yücecan, S. (2013). Stability of dietary phenolics and antioxidant properties of vegetables depends on cooking methodology. *Journal of Marmara University Institute of Health Sciences*, 3(1), 8-16. doi: 10.5455/musbed.20130118092619
- Leonel, M., Lopes-do Carmo, E., Mazetti-Fernandes, A., Peres-Soratto, R., Marques-Ebúrneo, J. A., Loli-Garcia, É., & Rodrigues-dos Santos, T. P. (2017). Chemical composition of potato tubers: the effect of cultivars and growth conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 54(8), 2372-2378. doi: 10.1007/s13197-017-2677-6
- Munyanenza, J. E. (2012). Zebra chip disease of potato: biology, epidemiology, and management. *American Journal of Potato Research*, 89(5), 329-350. doi: 10.1007/s12230-012-9262-3
- Munyanenza, J. E. (2015). Zebra chip disease, *Candidatus Liberibacter*, and potato psyllid: a global threat to the potato industry. *American Journal of Potato Research*, 92(2), 230-235. doi: 10.1007/s12230-015-9448-6
- Pedreschi, F. (2009). Fried and dehydrated potato products. In: Singh, J., & Kaur, L. (Eds.), *Advances in potato chemistry and technology* (pp. 319-337). Burlington: Academic Press Inc. (London) Limited. doi: 10.1016/B978-0-12-800002-1.00015-7
- estos compuestos con respecto a los tubérculos frescos osciló entre 60.4 y 98.4 %. Los tubérculos de genotipos con contenidos menores de fenoles registraron mayores pérdidas. Kalkan y Yücecan (2013) indican que la pérdida de fenoles después de freír oscila entre 20 y 76 %, y que el principal compuesto degradado es el ácido clorogénico.
- El contenido de AR y AT disminuyó, ya que parte de estos azúcares se utilizan en las reacciones de pardeamiento no enzimáticas que originan el color de las hojuelas fritas. Los datos obtenidos (Cuadro 5) son similares a los observados por Roe, Church, Pinchen, y Finglas (2013), quienes reportaron valores entre 0.3 y 1.5 g·100 g<sup>-1</sup> de AT en papas fritas.

## Conclusiones

Las diferencias entre años, localidades y genotipos, así como la interacción entre todos los factores influyeron en la calidad de los tubérculos y las hojuelas fritas. Por su parte, la precipitación, la altitud, la temperatura y la resistencia de los genotipos influyeron en los síntomas de la enfermedad de la PMP. Así, las mayores precipitaciones, las temperaturas más bajas y el uso de genotipos resistentes condujeron a la producción de tubérculos con el menor manchado interno y los mayores contenidos de almidón y materia seca, así como los menores contenidos de azúcares reductores y compuestos fenólicos. Estas condiciones permitieron obtener tubérculos adecuados para el procesamiento de las frituras, dando a éstas un color y textura aceptables. El clon 5-10 cultivado en Raíces, en ambos años, tuvo las mejores características fisicoquímicas para el consumo en fresco y el procesamiento de hojuelas fritas.

## Fin de la versión en español

- Pedreschi, F., Moyano, P., Kaack, K., & Granby, K. (2005). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Research International*, 38(1), 1-9. doi: 10.1016/j.foodres.2004.07.002
- Rodriguez-Saona, L. E., & Wrolstad, R. E. (1997). Influence of potato composition on chip color quality. *American Potato Journal*, 74(2), 87-106. doi: 10.1007/BF02851555
- Roe, M., Church, S., Pinchen, H., & Finglas, P. (2013). *Nutrient analysis of a range of processed foods with particular reference to trans fatty acids*. London: Food Composition and Diet Team. Retrieved from [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/167938/Summary\\_Report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/167938/Summary_Report.pdf)
- Rubio-Covarrubias, O. Á., Rangel-González, J. A., Flores-López, R., Magallanes-González, J. V., Díaz-Hernández, C., Zavala-Quintana, T. E., ... Paredes-Tenorio, A. (2000). *Manual para la producción de papa en las sierras y valles altos del centro de México*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Rubio-Covarrubias, O. Á., Almeyda-León, I. H., Cadena-Hinojosa, M. A., & Lobato-Sánchez, R. (2011). Relación entre *Bactericera cockerelli* y presencia de *Candidatus Liberibacter psyllae* en lotes comerciales de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 17-28. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342011000100002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000100002)
- Rubio-Covarrubias, O. Á., Cadena-Hinojosa, M. A., & Vázquez-Carrillo, G. (2013). *Manejo integrado de la punta morada de la papa en el estado de México*. Metepec: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - Centro de Investigación Regional Centro. doi: 10.13140/2.1.3912.0967
- Rubio-Covarrubias, O. Á., Cadena-Hinojosa, M. A., Flores-López, R., Munyaneza, J. E., Prager, S. M., & Trumble, J. T. (2015). Assessing zebra chip resistance of advanced potato clones under field conditions in the Toluca valley, Mexico. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 19(2), 18-28. Retrieved from [http://faculty.ucr.edu/~john/2015/Rubio\\_Covarrubias\\_615-1380-1-PB.pdf](http://faculty.ucr.edu/~john/2015/Rubio_Covarrubias_615-1380-1-PB.pdf)
- Rubio-Covarrubias, O. Á., Cadena-Hinojosa, M. A., Prager, S. M., Wallis, C. M., & Trumble, J. T. (2017). Characterization of the tolerance against zebra chip disease in tubers of advanced potato lines from Mexico. *American Journal of Potato Research*, 94(4), 342-356. doi: 10.1007/s12230-017-9570-8
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. doi: 10.1016/S0076-6879(99)99017-1
- Stark, J. C., & Love, S. L. (2003). Tuber quality. In: Stark, J. C., & Love, S. L. (Eds.), *Potato production systems: A comprehensive guide for potato production* (pp. 329-343). Idaho: University of Idaho Agricultural Communications. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Statistical Analysis System (SAS Institute Inc.). (2002). *Software product support manual, ver. 9.0*. Cary, N. C.: Author.
- Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., Ybarra-Moncada, M. C., Rubio-Covarrubias, O. Á., & Cadena-Hinojosa, M. A. (2013). Variables fisicoquímicas y calidad de fritura de clones de papa desarrollados para los Valles Altos de México. *Agrociencia*, 47(1), 47-60. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952013000100005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000100005)
- Wallis, C. M., Chen, J., & Civerolo, E. L. (2012). Zebra chip-diseased potato tubers are characterized by increased levels of host phenolics, amino acids, and defense-related proteins. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 78, 66-72. doi: 10.1016/j.pmpp.2012.02.001
- Wallis, C. M., Rashed, A., Wallingford, A. K., Paetzold, L., Workneh, F., & Rush, C. M. (2014). Similarities and differences in physiological responses to "*Candidatus Liberibacter solanacearum*" infection among different potato cultivars. *Phytopathology*, 104(2), 126-33. doi: 10.1094/PHYTO-05-13-0125-R