

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
Máster Universitario en Tecnología y Calidad Agroalimentaria



**ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA
REDUCIR LA FORMACIÓN DE
ACRILAMIDA EN PATATAS FRITAS:
UNA REVISIÓN**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Septiembre – 2022

AUTOR: Daniel Santamaría García

**DIRECTOR/ES: Luis Noguera Artiaga
Francisco Burló Carbonell**



MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍA Y CALIDAD AGROALIMENTARIA

VISTO BUENO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO 2022/2023

| Director/es del trabajo |
|---|
| D. Luis Noguera Artiaga y D. Francisco Miguel Burló Carbonell |

Dan su visto bueno al Trabajo Fin de Máster

| Título del Trabajo |
|---|
| Estrategias de mitigación para la reducción de acrilamida en patatas fritas: una revisión |
| Alumno |
| D. Daniel Santamaría García |

Orihuela, a 5 de septiembre de 2022

Firmado digitalmente por
LUIS|NOGUERA|
ARTIAGA
Fecha: 2022.09.05
20:03:45 +02'00'

Firma/s tutores trabajo



MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍA Y CALIDAD AGROALIMENTARIA

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título: Estrategias de mitigación para reducir la formación de acrilamida en patatas fritas: una revisión

Title: Mitigation strategies to reduce the formation of acrylamide in fried potatoes: a review

Modalidad (proyecto/experimental): Experimental

Type (project/research): Research

Autor/Author: Daniel Santamaría García

Director/es/Advisor: Luis Noguera Artiaga, Francisco Burló Carbonell

Convocatoria: Septiembre, 2022

Month and year: September, 2022

Número de referencias bibliográficas/number of references: 89

Número de tablas/Number of tables: 2

Número de figuras/Number of figures: 1

Número de planos/Number of maps: 0

Palabras clave (5 palabras): Acrilamida, patatas fritas, reducción, formación, toxicity

Key words (5 words): Acrylamide, fried potatoes, mitigation, formation, toxicity



MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍA Y CALIDAD AGROALIMENTARIA

RESUMEN:

La acrilamida es un contaminante que se produce al tratar térmicamente a elevadas temperaturas alimentos ricos en carbohidratos. Es considerado como probablemente carcinógeno y neurotóxico en humanos. El consumo de productos de patata fritos representa una de las principales fuentes de exposición dietética a la acrilamida en la población adulta. La reducción de la concentración de acrilamida ha sido de gran interés desde su descubrimiento en alimentos debido a su presencia en una amplia variedad de productos, toxicidad y niveles de exposición de la población. En este sentido, la aplicación de diversas estrategias antes del procesado (escaldado, condiciones de almacenamiento, tratamientos térmicos, etc.) y durante el procesado térmico de los alimentos (tipo de aceite, temperatura y tiempo) han demostrado ser eficaces para limitar la formación de acrilamida tanto a nivel industrial como doméstico. El presente trabajo se centra en realizar una revisión bibliográfica de aquellas estrategias capaces de reducir la formación de acrilamida en patatas fritas.

ABSTRACT:

Acrylamide is a contaminant that is produced when carbohydrate rich food products are heated at high temperature. It is considered to be a probable carcinogenic and neurotoxic substance in humans. The intake of fried potato products represents one of the main sources of dietary exposure to acrylamide in the adult population. The reduction of acrylamide concentration has been of great interest since its discovery in food products due to its presence in a wide variety of products, toxicity and the level of exposure of the population. To this effect, several strategies before processing (blanching, storage conditions, thermal treatments, etc.) and during thermal processing of foodstuff (type of oil, temperature and time) have been proven to limit the formation of acrylamide both at industrial and domestic settings. This review focuses on summarizing the research on those strategies capable of reducing the formation of acrylamide in fried potato products.

Estrategias de mitigación para reducir la formación de acrilamida en patatas fritas: una revisión

D. Santamaría ¹, F. Burló ¹ y L. Noguera-Artiaga ¹

¹ Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental de la Universidad Miguel Hernández (CIAGRO-UMH). Grupo de investigación Calidad y Seguridad Alimentaria. Carta, de Beniel, Km 3.2, 03320, Orihuela, España. e-mail: daniel.santamaria@goumh.umh.es

Resumen

La acrilamida es un contaminante que se produce al tratar térmicamente a elevadas temperaturas a alimentos ricos en carbohidratos. Es considerado como probablemente carcinógeno y neurotóxico en humanos. El consumo de productos de patata fritos representa una de las principales fuentes de exposición dietética a la acrilamida en la población adulta. La reducción de la concentración de acrilamida ha sido de gran interés desde su descubrimiento en alimentos debido a su presencia en una amplia variedad de productos, toxicidad y niveles de exposición de la población. En este sentido, la aplicación de diversas estrategias antes del procesado (escaldado, condiciones de almacenamiento, tratamientos térmicos, etc.) y durante el procesado térmico de los alimentos (tipo de aceite, temperatura y tiempo) han demostrado ser eficaces para limitar la formación de acrilamida tanto a nivel industrial como doméstico. El presente trabajo se centra en realizar una revisión bibliográfica de aquellas estrategias capaces de reducir la formación de acrilamida en patatas fritas.

Palabras clave: Acrilamida, patatas fritas, reducción, formación, toxicidad

Mitigation strategies to reduce the formation of acrylamide in fried potatoes: a review

Abstract

Acrylamide is a contaminant that is produced when carbohydrate rich food products are heated at high temperature. It is considered to be a probable carcinogenic and neurotoxic substance in humans. The intake of fried potato products represents one of the main sources of dietary exposure to acrylamide in the adult population. The reduction of acrylamide concentration has been of great interest since its discovery in food products due to its presence in a wide variety of products, toxicity and the level of exposure of the population. To this effect, several strategies before processing (blanching, storage conditions, thermal treatments, etc.) and during thermal processing of foodstuff (type of oil, temperature and time) have been proven to limit the formation of acrylamide both at industrial and domestic settings. This review focuses on summarizing the research on those strategies capable of reducing the formation of acrylamide in fried potato products.

Keywords: Acrylamide, fried potatoes, mitigation, formation, toxicity

Introducción

En 2002, la comunidad científica fue sorprendida por el descubrimiento de la presencia de acrilamida (aa) en alimentos, cuya forma polimerizada había sido utilizado hasta entonces y sigue siendo empleada actualmente a nivel industrial para la elaboración de papel, cosméticos, textiles, tratamiento de agua, entre otros usos (Mogol, Hamzalioglu y Gökmen, 2020). La acrilamida es un contaminante de proceso que se produce principalmente cuando alimentos que contienen azúcares reductores y asparagina libre se someten a temperaturas superiores a los 120 °C en condiciones de baja humedad. La formación de acrilamida depende principalmente de aspectos relacionados con la composición de los alimentos y de las condiciones de procesado térmico (Yang, Achaerandio y Pujolà, 2016). Este compuesto ya fue clasificado por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) años antes de su identificación en alimentos como probable carcinógeno en humanos (Grupo 2A) (IARC, 1994).

La presencia de acrilamida se ha observado en una gran variedad de alimentos como son los productos a base de patata (patatas asadas, patatas fritas, snacks de patata), productos a base de cereales (pan, galletas, alimentos infantiles, cereales de desayuno, bollería), frutos secos y semillas tostadas (almendras, sésamo), café y sus sustitutos, chocolate y snacks de frutas y vegetales fritos (Berk, Hamzalıoğlu, Gökmen, 2019). Sin embargo, el café, los productos a base de cereales y, especialmente, las patatas fritas (incluyendo las patatas asadas) son los principales alimentos que contribuyen a la exposición dietética de acrilamida, representando estas últimas hasta el 49 % de la exposición media en adultos (EFSA, 2015). Además, son los productos de patata fritos los que presentan la mayor concentración de acrilamida (Mousavi et al., 2020). Su elevada formación en este alimento se debe tanto al alto contenido de azúcares reductores y asparagina en el tubérculo fresco, como a la intensidad del tratamiento térmico aplicado durante la fritura (Mesias et al., 2021).

Desde un punto de vista toxicológico, diferentes organismos de evaluación del riesgo han concluido que teniendo en cuenta los niveles actuales de exposición dietética no se puede descartar el riesgo para la salud humana, debiendo continuar todos los esfuerzos para reducir el contenido de acrilamida en los alimentos (EFSA, 2015; JECFA, 2010). Por ello, la investigación de estrategias capaces de limitar la formación de acrilamida durante el tratamiento térmico de los alimentos, así como de los diferentes factores involucrados en su formación ha despertado un gran interés dentro de la comunidad científica.

Esta revisión se centra en resumir diferentes estrategias capaces de reducir la formación de acrilamida en patatas fritas. Además, debido a su relevancia y a que las estrategias de mitigación de acrilamida dependen principalmente de una mejor comprensión de la formación de este compuesto, también se abordan de forma resumida aspectos como la toxicidad y la formación de acrilamida.

Toxicidad de la acrilamida

La acrilamida se absorbe rápidamente distribuyéndose tras su ingestión a varios órganos como el corazón, el timo, el cerebro, el hígado, los riñones y la placenta causando efectos adversos en la salud (Matoso et al., 2019). La detoxificación de la acrilamida ocurre en el hígado principalmente a través de dos reacciones: (i) la oxidación por acción de la enzima citocromo P450 con su consecuente transformación a glicidamida (epóxido de la acrilamida); y, (ii) conjugación de la acrilamida y glicidamida con glutatión para formar derivados de ácidos mercaptúricos que pueden ser excretados por la orina. Tanto la glicidamida como la acrilamida pueden reaccionar con moléculas clave como la hemoglobina y el ADN, provocando los diferentes efectos adversos sobre la salud. Sin embargo, la glicidamida es más reactiva y tóxica que su compuesto parental (Kocadağlı y Gökmen, 2016).

Investigaciones llevadas a cabo en animales e *in vitro* han observado que la acrilamida presenta efectos neurotóxicos, genotóxicos, hepatotóxicos, así como efectos a nivel del sistema inmunitario y reproductor, entre otros (Bin-Jumah et al., 2021; Duan et al., 2015; Matoso et al., 2019; Omidi, Piravar y Ramezani, 2020; Semla et al., 2017). Además, como se ha comentado previamente, la acrilamida ha sido clasificada por la IARC como probable carcinógeno en humanos en base a estudios que muestran efectos carcinogénicos debido a la ingesta de acrilamida en roedores (IARC, 1994).

En su última evaluación de riesgo de la acrilamida, la Comisión Técnica de Contaminantes de la Cadena Alimentaria (CONTAM) de la de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) concluyó que la exposición dietética a la acrilamida aumenta potencialmente el riesgo de desarrollar cáncer para los consumidores de todos los grupos de edad (EFSA, 2015). Para llegar a estas conclusiones se empleó la herramienta del margen de exposición (MOE). El MOE relaciona el BMDL (rango de la dosis dentro del cual es probable que la acrilamida cause una pequeña pero apreciable incidencia de tumores u otros efectos adversos potenciales) observado en los estudios toxicológicos en animales y el nivel de exposición humano estimado. Sin embargo, pese a estas observaciones y a la existencia de evidencia que muestra que la acrilamida causa cáncer en animales, los estudios epidemiológicos realizados hasta la fecha son limitados y, hasta el momento, no han arrojado datos concluyentes sobre la asociación entre la exposición a la acrilamida y el desarrollo de cánceres en humanos (Zhivagui et al., 2019). Muchos de estos estudios no han encontrado asociación alguna entre el consumo estimado de acrilamida y un

aumento en el riesgo de padecer cáncer (Luning y Sanny, 2016; Obón-Santacana et al., 2015; Obón-Santacana et al., 2016). Mientras que algunas otras investigaciones sí han observado una relación significativa entre la exposición dietética a la acrilamida y el riesgo de desarrollar algunos tipos de cáncer como el de endometrio, ovario, mama y riñón (Adani et al., 2020; Luning y Sanny, 2016; Pelucchi et al., 2015; Hogervorst et al., 2016; Hogervorst et al., 2017).

En cuanto a sus efectos neurotóxicos, la acrilamida se considera neurotóxica en animales y humanos debido a que su exposición cumulativa puede resultar en neuropatía central y periférica (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022). Sin embargo, en este caso, el panel de la EFSA (2015) concluyó que considerando los niveles de exposición de la población general a la acrilamida no parece existir un riesgo para la salud con respecto a la neurotoxicidad.

Actualmente, no existen límites máximos de acrilamida en alimentos. Sin embargo, en 2018 entró en vigor el Reglamento (UE) 2017/2158 de la Comisión el cual establece niveles de referencia de acrilamida para diversas categorías de alimentos, fijando un valor de $500 \mu\text{g kg}^{-1}$ para patatas fritas (CE, 2017). Si bien la superación de estos valores de referencia no impide la comercialización de los productos analizados (a diferencia de los límites máximos), sí conlleva como obligación para el operador la revisión inmediata de su proceso de fabricación y la aplicación de las medidas de mitigación pertinentes con el objetivo de conseguir niveles de acrilamida que sean los más bajos razonablemente posibles (ALARA) y, siempre que sea viable, valores por debajo de los niveles de referencia (CE, 2017). Este reglamento también recoge una serie de medidas de mitigación de acrilamida y códigos de buenas prácticas que buscan la reducción de la exposición a la acrilamida en la población. La Comisión Europea está considerando la sustitución de los niveles de referencia por niveles máximos. En tal caso, sería ilegal vender un producto que contenga acrilamida por encima del nivel máximo (Delatour y Stadler, 2022).

Otras medidas de gestión del riesgo incluyen la Proposición 65 de California, conocida como Ley de Agua Potable Segura y Aplicación de Tóxicos, que obliga a los fabricantes a etiquetar los productos que contengan sustancias carcinógenas advirtiendo de su presencia. De esta forma, varias cadenas de restaurantes que venden alimentos que contienen acrilamida están publicando etiquetas/avisos de advertencia de acrilamida para reducir su consumo y promover una mejor salud pública (Maan et al., 2022). En Alemania, la Oficina Federal de Protección del Consumidor y Seguridad Alimentaria (BVL) desarrolló en 2002 un sistema de gestión del riesgo denominado “German signal” (Göbel y Kliemant, 2007). Además, existen documentos guía y códigos de prácticas, tanto a nivel nacional como internacional, con recomendaciones específicas para la reducción de acrilamida en diferentes categorías de alimentos. Algunos ejemplos son el código de prácticas (CXC 67-2009) del Codex Alimentarius (Codex Alimentarius, 2009), la guía de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) (FDA, 2016) y la “acrylamide Toolbox” elaborada por la asociación europea FoodDrinkEurope (FDE, 2019). Algunos extractos de estas guías también se han trasladado a folletos y campañas informativas para ayudar a los consumidores a minimizar la exposición a la acrilamida a nivel doméstico como el publicado por la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición en 2018 (AESAN, 2018).

Desde la publicación de las primeras iniciativas de gestión del riesgo los niveles de acrilamida en alimentos han sido reducidos paulatinamente. Sin embargo, según datos de la Asociación Europea de Snacks (ESA) sobre el contenido de acrilamida en patatas fritas de bolsa de 2002 a 2019, se produjo una reducción del 53 % de 2002 a 2011, pero luego se ha observado un estancamiento en los niveles de acrilamida hasta el año 2019 (Powers et al., 2021). En España, Mesías et al. (2020) observaron una tendencia similar. El contenido medio de acrilamida en patatas fritas de bolsa en 2019 fue un 55,3 % inferior al de 2004, un 10,3 % inferior al de 2008 y prácticamente similar a los resultados de 2014. Además, el 27 % de las muestras presentaron concentraciones por encima del nivel de referencia establecido en el Reglamento. Mesías et al. (2019) también investigaron el contenido de acrilamida en patatas fritas obtenidas en establecimientos de diez de las cadenas de restaurantes de comida rápida más relevantes de España y encontraron que el 13,5 % de las muestras presentaron concentraciones por encima del nivel de referencia. En otra investigación evaluaron el contenido de acrilamida de muestras de patatas fritas obtenidas de hogares españoles, observando en este caso que el 45,2 % de las muestras superaban los niveles de referencia (Mesías et al., 2018). Por otra parte, la Organización Europea de

Consumidores (Bureau Européen des Unions de Consommateurs, BEUC) da a conocer en 2019 resultados de diez organizaciones de consumidores que evidencian la insuficiencia en las medidas de protección establecidas para el control de acrilamida (González, Navarro y Ronco, 2021). Todo ello sugiere que deben continuar los esfuerzos para optimizar los enfoques de mitigación de acrilamida existentes y encontrar estrategias novedosas con el objetivo de seguir reduciendo los niveles de acrilamida en alimentos.

Formación de acrilamida

La acrilamida se forma en alimentos principalmente a través de la ruta de la asparagina de la reacción de Maillard en la cual la asparagina libre reacciona con azúcares reductores, como glucosa, fructosa y maltosa bajo condiciones de temperatura elevada (generalmente por encima de los 120 °C) (Delatour y Stadler, 2022). De forma resumida, se trata de una serie compleja de reacciones entre grupos amino y azúcares reductores en la que se forman productos intermedios (bases de Schiff) que finalmente se convierten en acrilamida (Albedwawi et al., 2021). Es una reacción importante para la industria alimentaria porque también produce los compuestos de color, sabor y aroma que dan a los alimentos fritos, horneados, tostados y asados los atributos que los consumidores esperan. Además, existen otras vías minoritarias a través de las cuales la acrilamida podría formarse a partir de la acroleína o mediante la 3-aminopropionamida como compuesto intermediario (Bachir et al., 2022). A pesar de que la formación de acrilamida ha sido ampliamente investigada, el proceso no se comprende en su totalidad por lo que conocer en mayor profundidad los mecanismos de formación de acrilamida sería de gran utilidad para desarrollar mejores estrategias de reducción de acrilamida (Albedwawi et al., 2021).

Puesto que la reacción de Maillard es la ruta predominante de formación de acrilamida, los principales precursores para la formación de este compuesto son la glucosa, fructosa y asparagina, compuestos naturalmente presentes en el material vegetal. La proporción de asparagina libre y azúcares reductores es mayor en patatas en comparación con otros productos ricos en almidón, por lo que la concentración del azúcar reductor suele ser el factor limitante para la producción de acrilamida en los productos a base de patata (Halford, Raffan y Oddy, 2022). Sin embargo, la concentración de asparagina libre puede contribuir a la variación en la formación de acrilamida, especialmente en variedades con concentraciones relativamente altas de azúcares reductores como son las variedades de patata utilizadas para elaborar patatas fritas en comparación con aquellas utilizadas para producir patatas fritas de bolsa (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022). Se ha observado que la concentración de asparagina libre contribuye a la variación en la formación de acrilamida cuando la relación entre asparagina libre y azúcares reductores es inferior a 2,3 aproximadamente (Muttucumaru et al., 2017).

La glucosa y fructosa son los principales azúcares reductores en patatas. La relación glucosa:fructosa también tiene un efecto sobre la formación de acrilamida. Ambos azúcares contribuyen a la formación de acrilamida, pero se ha observado que la fructosa aumenta hasta dos veces más la producción de acrilamida sobre los compuestos de color durante la cocción de patatas fritas, en comparación con la glucosa (Halford, Raffan y Oddy, 2022; Bachir et al., 2022). Además, la formación de acrilamida en patatas fritas se puede ver afectada por otras variables como son las condiciones de almacenamiento, tratamiento térmico y preprocesado, contenido de humedad del alimento, composición y pH, entre otros (Abboudi et al., 2016) (**Figura 1**). Profundizar en el conocimiento de aquellos factores que influyen sobre la formación de acrilamida es de gran relevancia para limitar su formación ya que, como se verá en las próximas secciones, las estrategias de mitigación se basan en modificar de cierta manera uno o varios de estos factores.

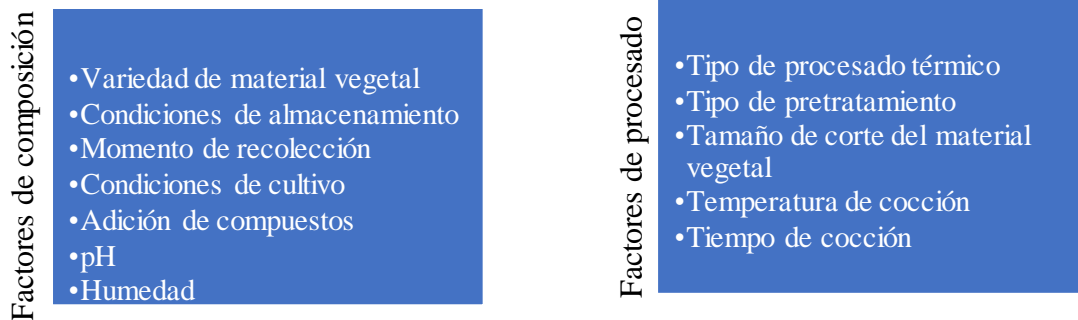


Figura 1. Factores que influyen sobre la formación de acrilamida en patatas fritas.

Método de búsqueda

Para llevar a cabo la búsqueda bibliográfica se utilizaron las bases de datos científicas (o motores de búsqueda) Scopus, ScienceDirect y PubMed con las palabras clave “acrylamide”, “mitigation”, “reduction”, “fried”, “potatoes”, “chips” y “French fries”. La búsqueda se limitó desde el año 2012 hasta el 2022, con mayor énfasis en la bibliografía publicada en los últimos 5 años (2017-2022). El principal criterio para la inclusión de la literatura en la revisión fue que las investigaciones se centrasen en estrategias de mitigación de acrilamida en patatas sometidas a un proceso de fritura. Sin embargo, se excluyeron las investigaciones realizadas en patatas fritas de bolsa listas para su consumo y otro tipo de productos fritos a base de patata. Si bien, gran parte de las estrategias revisadas son igualmente aplicables sobre estos tipos de productos, algunas de ellas no confieren los mismos resultados de mitigación debido a diferencias en la materia prima, tipo de procesado y características del producto final. Tras una búsqueda inicial se obtuvieron 626 resultados. Tras leer el título y eliminar duplicados se descartaron 545 estudios. Finalmente, tras leer la metodología se descartaron 25 estudios ya que no se adaptaban al criterio de inclusión previamente descrito. Se incluyeron un total de 50 estudios para la revisión.

Estrategias de mitigación de acrilamida

En vista de los potenciales riesgos para la salud humana y la inevitable formación de acrilamida en las patatas fritas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones para reducir la formación de este compuesto en patatas fritas utilizando diferentes estrategias, que incluyen tanto enfoques físicos como químicos y biológicos. Las estrategias de mitigación suelen aplicarse antes del tratamiento térmico principal (selección de las materias primas, condiciones de almacenamiento, escaldado e inhibición de la reacción de Maillard mediante la adición de compuestos, entre otros) o durante este (modificación de las condiciones de cocción y selección del tipo de aceite) y se basan principalmente en reducir la concentración de precursores de acrilamida o en obstaculizar la reacción de Maillard (Boyaci-Gunduz, 2022; Abboudi et al., 2016). Sin embargo, puesto que la reacción de Maillard es responsable del sabor y color característicos de las patatas fritas, reducir la formación de acrilamida sin comprometer significativamente las propiedades organolépticas del alimento se posiciona como el principal reto para el desarrollo y la aplicación de las estrategias de mitigación. Por último, es importante remarcar que no es posible la completa eliminación de la acrilamida de los alimentos. Por lo tanto, el objetivo principal deber centrarse en reducir la concentración al nivel más bajo que sea razonablemente posible.

Aspectos agronómicos y post-cosecha

Como se ha comentado previamente, uno de los enfoques para reducir la formación de aa consiste en reducir el contenido de precursores de aa (asparagina y azúcares reductores). Esto se puede lograr con la selección adecuada de las variedades de patata ya que la concentración de precursores es dependiente

de la variedad (Rosen et al., 2018). Vinci, Mestdagh y Meulenaer (2012) informaron que las variedades de patatas grandes, largas y ovaladas contenían menores concentraciones de azúcares reductores haciéndolas más apropiadas para la producción de patatas fritas. Por otro lado, las variedades de patata con un mayor contenido de materia seca (20-23 %) absorben menos aceite durante la fritura lo cual reduce el coeficiente de transmisión de calor resultando en una menor formación de aa (Nematollahi, Mollakhalili, Mousavi, 2022).

El estado de madurez del tubérculo está relacionado con el contenido de materia seca, aminoácidos y azúcares reductores por lo que recolectar los tubérculos en estado de madurez adecuado (cuando existe un menor contenido de azúcares reductores, sacarosa y mayor materia seca) impactará el contenido de aa tras la fritura (Rosen et al., 2018). La cosecha de tubérculos de patata inmaduros y de menor tamaño se asocia con mayores concentraciones de azúcares reductores y menor materia seca, así como una mayor probabilidad de sufrir endulzamiento por frío en comparación con su cosecha en la madurez fisiológica (Vinci, Mestdagh y Meulenaer, 2012).

Los efectos observados en la literatura de distintos regímenes de fertilización con azufre y nitrógeno sobre el contenido de asparagina y azúcares reductores en patatas son complejos, poco consistentes y altamente dependientes de la variedad de patatas. La aplicación de nitrógeno generalmente aumenta el potencial de formación de acrilamida de las variedades de patata utilizadas para freír (excluyendo las variedades para patatas de bolsa donde no se ha observado ningún efecto), pero con marcadas diferencias entre algunas variedades dentro de esta categoría. El azufre puede mitigar el efecto de una aplicación excesiva de nitrógeno, pero solo en algunas variedades de patata. La complejidad de estas observaciones implica que no se pueden dar recomendaciones generales por lo que deben continuar los esfuerzos en investigar el efecto de la fertilización sobre la formación de aa en patatas (Halford, Raffan y Oddy, 2022). Otros aspectos como las propiedades del suelo (composición mineral, humedad, temperatura y pH) y las condiciones climáticas también pueden influir en el contenido de precursores de aa (Rosen et al., 2018; Singh, Kukreja y Goutam, 2020).

Las condiciones de almacenamiento de las patatas pueden influir significativamente en la formación de acrilamida al afectar a la concentración de azúcares reductores. El almacenamiento de los tubérculos a temperaturas iguales o inferiores a 8 °C da lugar a un fenómeno llamado "endulzamiento por baja temperatura" que provoca un aumento en el contenido de azúcares reductores (Mogol, Hamzalioglu y Gökmen, 2020). Por ejemplo, Martínez et al. (2019) observaron que las concentraciones de azúcares reductores y acrilamida aumentan un 48 % y un 18–69 %, respectivamente, después de almacenar las patatas durante 4 meses a baja temperatura (8 °C). Por el contrario, si las temperaturas son demasiado elevadas se favorece la senescencia del tubérculo lo que también aumenta el contenido de azúcares (Rosen et al., 2018). Por lo tanto, como recomendación general, las patatas destinadas a la fritura deben almacenarse entre 8,5 y 9,5 °C (Halford et al., 2012). Aunque, como se comentará a continuación, algunos autores recomiendan temperaturas ligeramente superiores preferiblemente en combinación con compuestos inhibidores de la brotación (Paul, Ezekiel, y Pandey 2018; Perera, Hewavitharana y Navaratne, 2021). Otro aspecto importante que controlar durante el almacenamiento son los brotes en las patatas, ya que su aparición resulta en la producción de compuestos indeseables como las solaninas, así como un aumento en los azúcares reductores. El almacenamiento a bajas temperaturas (<8 °C) y el uso de inhibidores químicos de la brotación son los principales métodos utilizados para controlar la brotación de las patatas durante el almacenamiento (Dourado et al., 2019). No obstante, como ya se ha comentado, el almacenamiento a tales temperaturas aumenta los azúcares reductores en las patatas por lo que el almacenamiento a temperaturas superiores (10-12 °C) en combinación con el uso de inhibidores resulta más eficaz para el control de los azúcares reductores (Perera, Hewavitharana y Navaratne, 2021). Sin embargo, actualmente existe una creciente demanda de inhibidores de la brotación menos sintéticos como alternativa a los utilizados comercialmente debido a sus potenciales riesgos para la salud, por lo tanto, es necesario desarrollar otro tipo de inhibidores para disminuir la brotación en patatas (Paul, Ezekiel y Pandey, 2016). En este sentido, se han llevado a cabo algunas investigaciones sobre el uso de aceites esenciales (eugenol, mentol y carvona) observándose un efecto anti-brotación así como menor contenido de azúcares reductores en comparación con los tubérculos no tratados (Abbasi et al., 2015; Nayana et al., 2019).

Otro de los enfoques se basa en el pre-acondicionamiento, que consiste en mantener los tubérculos previamente almacenados en frío a temperaturas más elevadas, generalmente entre 13-20 °C, durante 2 o 3 semanas, con el objetivo de convertir los azúcares reductores en almidón. Se trata de una etapa fundamental para los tubérculos que han sido almacenados a bajas temperaturas o que han sido cultivados y recolectados en zonas con bajas temperaturas y que van a someterse a un proceso de fritura. Elbashir y Saeed (2014) observaron una disminución del 90-95 % en los azúcares reductores tras el reacondicionamiento (18 °C durante 25 días) de patatas previamente almacenadas a 4 °C. Otras investigaciones también han observado disminuciones de los azúcares reductores con reacondicionamientos a 22 y 15 °C durante 21 días (Rosen et al., 2019).

Estrategias antes de la fritura

La acrilamida se forma principalmente en las zonas superficiales de la patata debido a las mayores temperaturas alcanzadas y menor contenido de humedad por lo que el tamaño y la forma de corte del producto (relación superficie-volumen) también tienen un impacto sobre su formación. Disminuir la relación entre el área superficial y el volumen mediante el corte de las patatas en tiras más gruesas y de mayor tamaño resulta en menor formación de aa (FDE, 2019). Además, puesto que la región periférica de los tubérculos tiene un mayor contenido de azúcares reductores, las tiras finas cortadas de la zona exterior de los tubérculos presentan un mayor contenido de aa. Por lo tanto, su eliminación puede contribuir a una reducción de la aa (Vinci, Mestdagh y Meulenaer, 2012). Por otro lado, se ha observado una correlación entre la rugosidad de la superficie cortada de la patata y la entrada de aceite durante la fritura. Un corte poco limpio aumenta los espacios vacíos en la superficie de las piezas de patata de forma que retienen más aceite y aumenta el coeficiente de transmisión de calor. Utilizar cuchillas bien afiladas para el corte de las patatas podría disminuir la formación de aa (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022).

El escaldado es una operación importante para reducir el contenido de aa en patatas fritas que consiste en sumergir las patatas en agua a temperaturas entre 65-80 °C durante un corto período de tiempo, normalmente entre 10-30 min (Zhang et al., 2018). El escaldado es una de las prácticas más sencillas que puede practicarse a nivel doméstico para reducir la formación de aa. La reducción en el contenido de aa se debe principalmente a la lixiviación de sus precursores. Además, también se produce la gelatinización de la capa externa de las piezas de patata, lo que resulta en una menor absorción de aceite durante la fritura y menor formación de aa (Zhang et al., 2018). Se han observado reducciones del 65 % en el contenido de aa tras un escaldado tradicional a 70 °C durante 15 min (Vinci, Mestdagh y Meulenaer, 2012). Parece ser que tiempos de escaldado más cortos a mayores temperaturas resultan más efectivos para la reducción de aa que escaldados de mayor duración a menor temperatura (Maan et al., 2022). Sin embargo, superar ciertas temperaturas (>80 °C, aproximadamente) puede afectar negativamente a las características sensoriales de las patatas fritas y resultar en una mayor absorción de aceite (Zhang et al., 2018). Además, como se verá en las próximas secciones, el escaldado se puede aplicar en combinación con la adición de diferentes compuestos ya que de esta manera se altera la estructura de la superficie de la patata aumentando la permeabilidad y favoreciendo la interacción de los aditivos con el material vegetal (Dourado et al., 2020).

El secado de las piezas de patata escaldadas o remojadas antes de la fritura reduce el contenido de humedad y modifica la estructura de la superficie de forma que se reduce la absorción de aceite y la duración del tiempo de fritura necesario para conseguir los parámetros de calidad deseados lo que resulta en una menor formación de aa (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022).

Varias investigaciones han observado reducciones en la formación de aa en patatas fritas mediante la adición de compuestos como los aminoácidos, ácidos orgánicos, sales y antioxidantes, entre otros (**Tabla 1**). Sin embargo, el efecto de algunos de estos compuestos ha sido únicamente investigada a escala de laboratorio por lo que es de gran relevancia realizar estudios a mayor escala para evaluar su efectividad a nivel industrial.

Tabla 1. Adición de compuestos para reducir la formación de acrilamida en patatas fritas.

| Compuesto | Condiciones de aplicación | Reducción (%) | Referencia |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------|
| Goma arábiga y antioxidantes | Escaldado (3 min, 90 °C) y remojo | 88 | Mousa y Mousa, 2018 |
| NaCl | (60 min, Temp. Ambiente (TA)) | 78 | |
| Romero | Remojo (60min, TA) | 73-96 | Al-Anbari et al., 2019 |
| Ácido cítrico | | 76-81 | |
| NaCl | | 68-82 | |
| Romero+ácido cítrico+NaCl | | 99 | |
| Glicina | Remojo | 55-88 | Sansano et al., 2015 |
| Lactato cálcico | | 68 | |
| Ácido Cítrico | | 77-91 | |
| Carboximetilcelulosa | Remojo (60 min, TA) | 62,9 | Mousavian et al., 2015 |
| β -ciclodextrinas | Adición al aceite de fritura | 15 | Pérez-López et al., 2021 |
| β -ciclodextrinas y carvacrol | | 40 | |
| Florizina | Remojo (60 min, 40 °C) | 74 | Yang et al., 2020 |
| VOSO ₄ | Remojo (60 min, TA) | 53-89 | Kalita y Jayanty, 2013 |
| CaCl ₂ | | 72 | |
| Pectina | Remojo (30 s, TA) | 48 | Al-Asmar et al., 2018 |
| Quitosano | | 38 | |
| Metilcelulosa | Remojo (10 s, TA) | 93 | Iyer et al., 2018 |
| Carboximetilcelulosa | | 85 | |
| Agua | Remojo (1h, TA) y escaldado | 74 | Liu et al., 2020 |
| Ácido acético | posterior (80 °C, 10 min) | 95 | |
| Extracto de jengibre | Remojo (1min, TA) | 22 | Haddarah et al., 2021 |
| Extracto de borraja | | 66 | |
| Extracto de hinojo | | 29 | |
| Glutación | Remojo (1 min, 25 °C) | 70 | Cerit y Demirkol, 2021 |
| Cisteína | | 68 | |
| Acetilcisteína | | 67 | |
| Ácido cítrico | Remojo (60 min, TA) | 84 | Khalaf et al., 2015 |
| CaCl ₂ | | 85 | |
| Agua | Escaldado (5 min, 65 °C) | 19 | Liyanage et al., 2021 |
| Ácido acético | | 31 | |
| Ácido cítrico | | 38 | |
| Glicina | | 49 | |
| Alginato | Remojo (30 min, 20 °C) | 77 | Liu, Li y Yuan, 2020 |
| Ácido p-cumárico | Remojo (30 min, TA) | 66 | Xu y An, 2016 |

Una de las técnicas de mitigación de aa más prometedoras es el tratamiento enzimático. Para ello, se utiliza la asparaginasa formada por algunas bacterias, hongos y plantas. Esta enzima cataliza la conversión de asparagina en amoníaco y ácido aspártico, lo que impide que la asparagina pueda reaccionar para formar acrilamida (Mogol, Hamzalioglu y Gökmen, 2020). En el caso de las patatas, la incubación con asparaginasa se suele realizar antes o junto a un periodo de escaldado para facilitar el contacto entre la enzima y la asparagina (Dourado et al., 2020) (**Tabla 2**). Las condiciones de tiempo, temperatura y pH deben ajustarse para optimizar la actividad enzimática (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022). También existen enzimas comerciales, siendo Acrylaway® y PreventAse® (producidas a partir de *Aspergillus oryzae* y *Aspergillus niger*) algunas de las más utilizadas (Delatour y Stadler, 2022).

La formación de aa depende en gran medida del pH. Un pH en torno a 8 favorece la formación de acrilamida. Por lo tanto, la adición de acidulantes como el ácido cítrico, láctico, acético, etc. reduce la formación de aa mediante la disminución del pH. A nivel de laboratorio se han observado reducciones de hasta el 90 % en la formación de aa en patatas fritas (Baskar y Aiswarya, 2018). A pesar de estos resultados prometedores a escala de laboratorio, su aplicación en la producción industrial no ha resultado ser tan efectiva (FDE, 2019).

Tabla 2. Aplicación de asparaginasa en patatas fritas.

| Origen | Condiciones óptimas de actividad | Condiciones de aplicación | Reducción (%) | Referencia |
|--|----------------------------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
| <i>Aquabacterium</i> sp. A7-Y | pH 9, 60 °C | 45 °C, 30 min | 88,2 | Sun et al., 2016 |
| <i>Aspergillus oryzae</i> CCT 3940 | pH 6–8, 40–50 °C | 50 °C, 30 min | 72 | Dias et al., 2017 |
| Enzima comercial de <i>Aspergillus oryzae</i> (Acrylaway®) | | | 92 | |
| <i>Bacillus subtilis</i> KDPS1 | pH 5, 37 °C | Sin especificar | 90-95 | Sanghvi et al., 2016 |
| Bacterias de raíces de la soja | pH 8, 40 °C | 40 °C, 30 min | 87,9 | Liu et al., 2019 |
| <i>Thermococcus zilligii</i> AN1 | pH 8,5, 90 °C | 80 °C, 4 min | 80,5 | Zuo et al., 2015 |
| <i>Aureobasidium pullulans</i> L1 | Sin especificar | 25 °C, 30 min | 83 | Di Francesco et al., 2019 |

Los cationes mono y divalentes como Na⁺ y Ca²⁺, reaccionan con la asparagina e inhiben la formación de bases de Schiff y, por lo tanto, la formación de acrilamida. Estas sales también reducen la absorción de aceite durante la fritura, lo que reduce el coeficiente de transferencia de calor y la formación de aa (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022). También se ha investigado el uso de otras sales como el sulfato de vanadio (Maan et al., 2022). La aplicación de las sales se suele llevar a cabo sumergiendo las piezas de patatas durante 20-60 min en soluciones salinas. Se han observado disminuciones en el contenido de acrilamida entre 41 y 92,5 % (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022; Kalita y Jayanty, 2013).

Varios estudios han investigado los efectos de diferentes hidrocoloides como la goma arábiga, el quitosano, el ácido alginico y la pectina sobre la formación de aa en patatas fritas, observando reducciones de hasta el 95 % (Mousavian, Niazmand y Sharayei, 2015; Al-Asmar et al., 2018; Iyer et al., 2018). Parece ser que estos efectos se deben a la gelificación de los hidrocoloides durante el inicio de la fritura (entorno a los 60 °C) lo que modifica la superficie de las piezas de patata resultando en una menor absorción de aceite. Además, los hidrocoloides reducen todavía más el coeficiente de transmisión de calor al generar burbujas de vapor de agua alrededor de las piezas de patata. Por otro lado, también se cree que algunos aminoácidos presentes en hidrocoloides como el quitosano y la goma arábiga compiten con la asparagina inhibiendo la formación de aa (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022). Sin embargo, se ha observado que hidrocoloides como la goma xantana, el carragenano y la goma garrofín pueden llegar a aumentar la formación de aa (Perera, Hewa vitharana y Navaratne, 2021).

El uso de aminoácidos ha sido más estudiado en otro tipo de alimentos (principalmente productos a base de cereales) obteniendo reducciones de hasta el 90 % en el contenido de aa (Pal Murugan et al., 2016). Sin embargo, las investigaciones llevadas a cabo en patatas fritas son escasas. Sansano et al. (2015) observaron que remojar las patatas antes de la fritura en soluciones al 1 % y 2 % de glicina a temperatura ambiente durante 60 min redujo la formación de acrilamida en un 80 % y 55 %, respectivamente. Teniendo en cuenta estos resultados sería interesante realizar más estudios sobre el uso de aminoácidos para reducir el contenido de aa en patatas fritas.

Diversas investigaciones han evaluado el efecto del uso de antioxidantes sobre la formación de aa en alimentos. Sin embargo, los resultados obtenidos son contradictorios y poco concluyentes, donde algunos estudios han observado grandes reducciones mientras que otros no han observado ningún efecto o incluso aumentos en la formación de aa. Actualmente, no se conocen en profundidad los mecanismos responsables de estos efectos, pero podrían deberse a la capacidad de los antioxidantes con diferentes estructuras o grupos funcionales para reaccionar con los precursores de la aa, con los intermediarios de la reacción o con la propia acrilamida, lo que produce efectos reductores o promotores (Jin, Wu y Zhang, 2013). Por ejemplo, se ha observado que los antioxidantes con grupos carbonilo aumentan la formación de aa. Varios antioxidantes y extractos de plantas como el ácido ascórbico, extracto de té verde, extracto de uva, y el ácido gálico han sido capaces de reducir la formación de aa en alimentos mientras que otros como la curcumina y los tocoferoles se ha observado que conducen a un aumento en el contenido de aa (Nematollahi, Meybodi y Khaneghah, 2021). En patatas fritas, Xu y An (2016) observaron que la inmersión de las piezas de patata en una solución al 0,1 % de ácido p-cumárico redujo la formación de

aa en un 66 %. Más recientemente, Mekawi, Sharoba y Ramadan (2019) observaron una reducción del 54 % en la formación de aa al utilizar un extracto de antioxidantes de la cáscara de grana. También se ha investigado la adición de antioxidantes al aceite de fritura. Por ejemplo, Pérez-López et al. (2021) añadieron un complejo de β -ciclodextrinas y carvacrol observando una reducción de hasta el 40 %, sin afectar negativamente a la aceptación sensorial de las patatas fritas.

Condiciones de fritura

Es de gran relevancia controlar los parámetros de tiempo y temperatura de la fritura para minimizar la formación de aa. En general, la concentración de acrilamida aumenta al incrementar la temperatura y, a una temperatura dada, la formación de acrilamida aumenta a mayor tiempo de fritura (Maan et al., 2022). Se recomienda que la temperatura de fritura no supere los 170–175 °C y una temperatura más baja durante la etapa final de fritura ayuda a disminuir la formación de acrilamida, aunque aumenta el contenido de aceite de las patatas (FDE, 2019). Se ha observado que una temperatura del aceite más alta de 170-190 °C es suficiente para que la superficie de la patata alcance los 120 °C y disminuya el contenido de humedad rápidamente (Zhu et al., 2016). Un estudio reciente observó una reducción de la acrilamida de hasta un 90 % cuando la temperatura de fritura se redujo de 190 a 160 °C (Liyange et al., 2021). En otro estudio, un aumento de la temperatura de fritura de 150 a 180 °C resultó en un incremento del 97 % en el contenido de acrilamida (Torang y Alemzadeh, 2016).

También se ha observado que el tipo de aceite de fritura tiene un impacto sobre la formación de aa. Sin embargo, la evidencia es poco concluyente. Las investigaciones llevadas a cabo por Zhang et al. (2015) mostraron que las patatas fritas en aceites con coeficientes de transferencia de calor más elevados contenían mayores concentraciones de aa ($1219 \mu\text{g kg}^{-1}$) en comparación con las fritas con aceites con coeficientes más bajos ($913 \mu\text{g kg}^{-1}$). Başaran y Turk (2021) observaron la mayor formación de aa en las patatas fritas en aceite de maíz ($1144 \mu\text{g kg}^{-1}$), seguido del aceite de girasol ($1037 \mu\text{g kg}^{-1}$), aceite de oliva ($1007 \mu\text{g kg}^{-1}$) y aceite de avellana ($966 \mu\text{g kg}^{-1}$). Por el contrario, otros investigadores no han encontrado correlación entre el tipo de aceite y la formación de aa (Nematollahi, Mollakhalili y Mousavi, 2022). Por otro lado, la generación de productos de oxidación lipídica durante la fritura también parece afectar a la formación de aa. En un estudio reciente, se observó que las patatas que fueron fritas en aceites reutilizados presentaron una mayor concentración de aa que aquellas fritas en aceites no oxidados (Başaran y Turk, 2021). Esto puede deberse a que la fritura repetida aumenta los compuestos polares y varios productos oxidativos en el aceite capaces de reaccionar con la asparagina para formar acrilamida.

Conclusiones

Los niveles actuales de exposición de la población a la acrilamida resultan preocupantes en cuanto a sus efectos carcinogénicos. El consumo de patatas fritas representa una de las principales fuentes de exposición dietética a la acrilamida por lo que la reducción de su formación en este alimento es de suma importancia. En este sentido, se han investigado multitud de estrategias capaces de limitar la formación de este compuesto en patatas fritas. Estas estrategias se aplican antes o durante la fritura y se basan en reducir el contenido de precursores en la materia prima o en obstaculizar la reacción de Maillard. Las estrategias que han conseguido mayores reducciones son el uso de asparaginasa y la adición de acidulantes y antioxidantes. Sin embargo, la mayoría de las estrategias únicamente se han investigado a escala de laboratorio y su aplicación puede afectar negativamente a la calidad sensorial de las patatas por lo que es necesario llevar a cabo más investigaciones para evaluar su idoneidad a nivel industrial y reducir su impacto negativo sobre las propiedades organolépticas de las patatas fritas.

Bibliografía

Para visualizar la literatura consultada en este trabajo acceder al siguiente enlace:

https://docs.google.com/document/d/1K1_KTFTzrXtQspPQy3lLi4ECIzVmTXMUocx_sNI92c/edit?usp=sharing