



Efecto de la concentración de hipoclorito de sodio y tiempo de oxidación sobre el grado de sustitución de grupos carboxilo, índice de absorción de agua y temperatura de gelatinización de almidón de Achira (*Canna edulis* Ker)

Effect of sodium hypochlorite concentration and oxidation time on the degree of substitution of carboxyl groups, water absorption index and gelatinization temperature of Achira starch (*Canna edulis* Ker)

Oscar Michael Carhuallay Zegarra; Ever Cerna Vargas; Jorge Vicente Polo Quispe; Elmer Humberto Sandoval Ruiz; Daniel José Salvador Rodríguez*

Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la concentración de hipoclorito de sodio (0,5 – 1,5 %p/p) y tiempo de oxidación (40 – 90 min) sobre el grado de sustitución de grupos carboxilo, índice de absorción de agua (IAA) y temperatura de gelatinización de almidón de Achira (*Canna edulis* Ker). Se utilizó un diseño factorial 2^k para estudiar el comportamiento de la respuesta en función de los factores utilizados. Los modelos obtenidos para el grado de sustitución de grupos carboxilo, temperatura de gelatinización e IAA fueron validados a través del Análisis de Regresión y ANOVA (significativo en los tres casos). Se determinó que a menor concentración de hipoclorito de sodio y tiempo de oxidación se obtenían una disminución en el grado de sustitución de grupos carboxilo y un incremento en el índice de absorción de agua, la temperatura de gelatinización permaneció sin una tendencia notable entre los tratamientos, pero registró una clara disminución con respecto al almidón nativo.

Palabras clave: almidón oxidado; grupos carboxilo; gelatinización; índice de absorción de agua.

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to evaluate the effect of hypochlorite concentration (0.5-1.5% w / w) and oxidation time (40-90 min) on the degree of substitution of carboxyl groups, water absorption index (WAI) and gelatinization temperature of Achira starch (*Canna edulis* Ker). A 2^k factorial design was used to study the response behavior based on the factors used. The models obtained for the degree of substitution of carboxyl groups, gelatinization temperature and WAI were validated through Regression Analysis and ANOVA (significant in all three cases). It was determined that at a lower concentration of sodium hypochlorite and oxidation time, a decrease in the degree of substitution of carboxyl groups and an increase in the rate of water absorption were obtained, the gelatinization temperature remained without a clear trend between treatments, but it registered a remarkable decrease with respect to native starch.

Keywords: oxidized starch; carboxyl groups; gelatinization; water absorption index.

1. Introducción

Se conoce poco sobre la Achira (Figura 1a), aun así, se afirma que es de origen Sudamericano. Según hallazgos arqueológicos, muestran restos de achira en Perú en el año 2500 A.C., donde se encontraron vasijas moldeadas con la forma de rizomas de achira pertenecientes a las culturas Chimú y Nazca, que gracias a sus condiciones ecológicas la excluyen de ser una planta silvestre, pero se asume que el centro de domesticación fue en el área tropical de Colombia

y pudo haberse difundido rápidamente a través de los Andes a la costa occidental hasta el norte de Chile y de esta forma podemos encontrarla en toda América tropical (Sarmiento, 2016).

Rodríguez *et al.* (2003) mencionan que la Achira es una planta de origen andino y que sus usos son generalmente para la extracción de almidón de sus rizomas (Figura 1b), y muchas veces se utiliza para la fabricación de bizcochos de achira, pan de sagú y otros productos tradicionales.



Figura 1. a) Planta de Achira. b) Rizoma de Achira.

El almidón es un polímero de origen natural que puede ser obtenido de varias fuentes como cereales, raíces, tubérculos y frutos inmaduros (Tabla 1), constituyendo el componente orgánico más abundante en la naturaleza, después de la celulosa (Ashogbon y Akintayo, 2014). Existen fuentes no convencionales de las cuales se puede extraer el almidón, como lo son la tapioca, la avena, el plátano, la cebada, el arroz, el frijol, la lenteja, el sorgo, entre otros (Acuña, 2012). Se utiliza en la industria alimenticia como estabilizante, agente de relleno, adhesivo, ligante, enturbiante, formador de películas, estabilizante de espumas entre otros (Singh et al., 2005). Se utiliza también como material biodegradable en la industria textil, del papel y empaques (Bertolini, 2010).

Tabla 1

Porcentaje de almidón en distintos productos agrícolas

Producto agrícola	Almidón base húmeda (%)
Plátano	65,23 ^{ab}
Manga	74,87 ^a
Achira	60,47 ^a
Camote	65,35 ^{ab}
Oca	57,95 ^b

Fuente: ^aBetancur-Ancona (2001), ^bHernández-Medina et al. (2008)

El proceso tradicional de extracción del almidón de rizomas consiste fundamentalmente en romper las paredes celulares para liberar los gránulos de almidón mediante un rallado, seguido de la adición

de agua y filtración, lo que permite la separación de las partículas de almidón suspendidas en el medio líquido de aquellas que son relativamente más grandes, como los componentes de la fibra, posteriormente se elimina el agua y se lava el material sedimentado para eliminar las últimas fracciones diferentes del almidón para finalmente someter al almidón purificado a un secado (Alarcón y Dufour, 1998).

Las modificaciones en el almidón involucran el tratamiento del gránulo por medios físicos, químicos y bioquímicos que causan la modificación de la molécula, lo cual permite realzar o inhibir en el almidón propiedades fisicoquímicas, mejorando sus aplicaciones (Badui, 2012).

Los almidones oxidados actualmente representan los grupos más grandes de almidones modificados en producción, además de proveer al almidón no solo un cambio en su color (blanqueado), si no en la producción de grupos carboxilo (Figura 2), los que ayudan a la estabilización de las moléculas lineales de amilosa, minimizan la retrogradación; además de definir la magnitud de la oxidación (Steve, 2005).

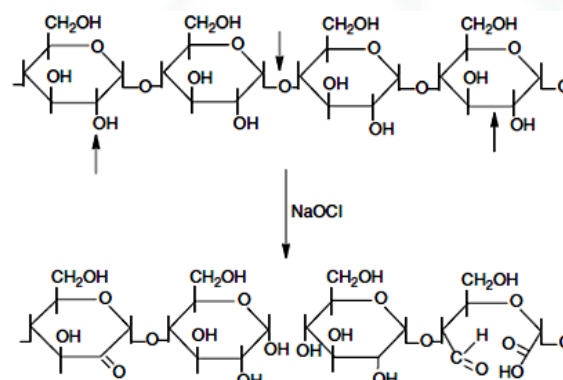
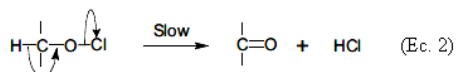
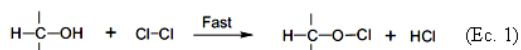


Figura 2. Hipoclorito oxidación del almidón, mostrando formación de carbonilo y carboxilo (Steve, 2005).

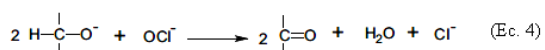
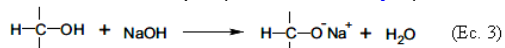
La oxidación del almidón es una de las modificaciones más comunes que consiste en un blanqueamiento de los gránulos de almidón; usualmente se utilizan agentes oxidantes económicos como hipoclorito de sodio (NaClO) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂), además de agentes químicos oxidantes más agresivos como el permanganato de potasio (KMnO₄), peryodato (IO₄⁻) y ozono (O₃), requiriéndose para esto de un cuidadoso control de pH y temperatura (Guo et al., 2015; Sangseethong et al. 2010).

Steve (2005) explica que, bajo condiciones ácidas, hay dos pasos involucrados como se muestra a continuación. El cloro, un producto de la rápida conversión del hipoclorito, reacciona con los grupos hidroxilo en las moléculas de almidón (Ecuación 1), y además proporciona el almidón oxidado mediante

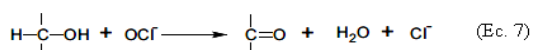
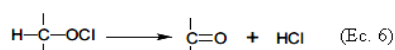
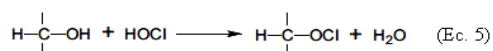
la formación de un grupo ceto (Ecuación 2). Los protones (átomos de hidrógeno) se liberan en ambas reacciones. Sin embargo, bajo condiciones ácidas hay un exceso de protones, que impiden la liberación de más protones, por lo tanto, disminuyen la velocidad de reacción:



En medio alcalino, tanto el almidón como el hipoclorito llevarán cargas negativas. Los dos iones cargados negativamente se repelerían entre sí; como resultado, la velocidad de reacción disminuye con el aumento del pH (Ecuaciones 3 y 4).



En medios neutros o leves (ligeramente ácidos o básicos), el almidón es neutro y el hipoclorito está principalmente no disociado (ácido hipocloroso). La reacción del ácido hipocloroso con almidón puede ocurrir fácilmente, y luego producir el almidón oxidado (Ecuaciones 5 y 6). El almidón neutro reaccionará con cualquier anión hipoclorito para formar el producto oxidado (Ecuación 7).



La oxidación es un método ampliamente estudiado debido a que el almidón obtenido como resultado de este proceso presenta menor viscosidad, mayor estabilidad y solubilidad, así como también un reducido tamaño molecular en comparación con el almidón nativo (Chen et al., 2015). Adicionalmente, es importante mencionar que el control adecuado de ciertas condiciones como la concentración del agente oxidante, la temperatura y pH favorecen el proceso oxidativo. Algunos autores han reportado que la oxidación ocasiona disminución en la temperatura de empastamiento, en la viscosidad de las suspensiones de almidón y en la tendencia a la retrogradación (Bonilla et al., 2013).

Los almidones oxidados, se utilizan en la producción de papel, productos textiles, fármacos y alimentos; estos proveen una amplia gama de propiedades, como baja viscosidad, alta estabilidad, mayor claridad, formación de películas claras, entre otras (Champe, 2011).

El grado de sustitución de grupos carboxilo es un parámetro que se utiliza para determinar la sustitución de grupos carboxilo a través de la oxidación.

La gelatinización es el proceso en el que los gránulos del almidón por acción del calor empiezan a hidratarse, siendo los de mayor tamaño los que gelatinizan primero. A medida que incrementa la temperatura el volumen del gránulo va aumentando hasta llegar al punto donde no puede absorber más agua para posteriormente romperse parcialmente dando lugar a la formación de una pasta gelificada.

El índice de absorción de agua (IAA) mide la cantidad de agua absorbida por el almidón. El almidón tiene la habilidad de enlazar moléculas de agua, propiedad importante en las aplicaciones donde se requiere una textura seca o con consistencia (González et al., 2014). Las diferencias en el IAA de almidones nativos, puede estar relacionada con la variedad de la fuente biológica, el tamaño y la forma del gránulo (Lozano et al., 2013). La retención de agua es un proceso notablemente influido por el estado físico (cristalino o amorfo), bajo el que se encuentran las redes moleculares que por otra parte va a depender del procesamiento. Así, en el proceso de gelatinización las partes amorfas se hidratarán más fácilmente que las cristalinas.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la concentración de hipoclorito de sodio (0,5 – 1,5 %p/p) y tiempo de oxidación (40 – 90 min) sobre el grado de sustitución de grupos carboxilo, índice de absorción de agua (IAA) y temperatura de gelatinización de almidón de Achira (*Canna edulis* Ker).

2. Material y métodos

Obtención del almidón. Se empleó raíces recién cosechadas de achira (*Canna edulis* Ker), provenientes del caserío de Yanasara, distrito de Curgos, provincia Sánchez Carrión, región La Libertad, ubicado a una altura de 2939 m.s.n.m. El procedimiento general para la obtención de almidón se observa en la Figura 3, los procesos principales son el rallado y el lavado del almidón precipitado. Se realizó un lavado de rizomas de achira utilizando agua a para eliminar todo rastro de tierra, luego se procedió a pelar los rizomas, para posteriormente rallarlos incorporando agua. Luego se realizó un tamizado del rizoma rallado. A continuación, se agregó agua para lavar el almidón para luego dejarlo sedimentar, luego se retiró el agua de lavado para agregar nuevamente agua limpia para realizar el segundo lavado y segundo sedimentado, se repitió el procedimiento de lavado y sedimentación por tercera vez.

Finalmente se retiró el agua quedando solamente el almidón sedimentado, el cual se puso a secar por 48 horas a una temperatura de 40 °C en una estufa convectiva. Una vez secado se procedió a la molienda y tamizado.

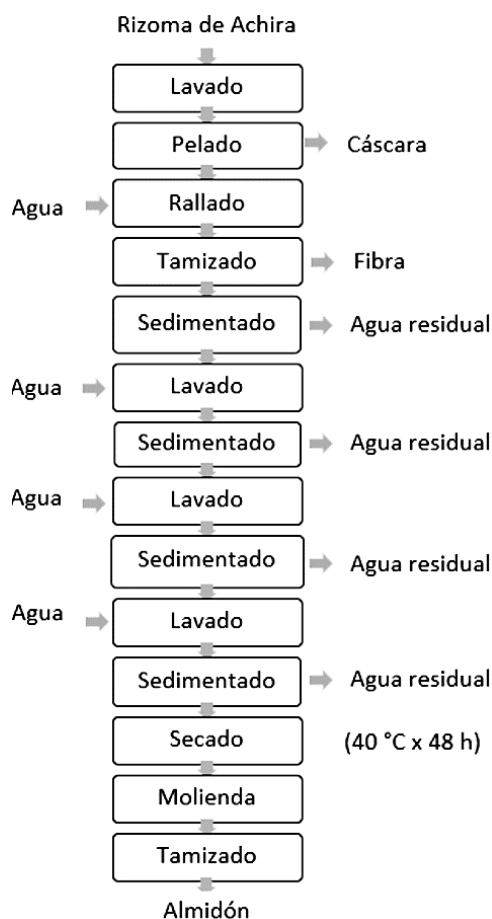


Figura 3. Diagrama de flujo para extracción de almidón.

Oxidación del almidón. La Oxidación se realizó con el método usado por Sánchez (2004). Se pesó 120 g de almidón nativo en un vaso de precipitado de 500 mL, seguidamente se adicionó 450 mL de agua de destilada y se calentó hasta 35°C (temperatura usada durante toda la modificación) con agitación constante. Luego se ajustó el pH entre 9 – 9,5 con NaOH 2N utilizando un pHmetro; seguidamente se adicionó el NaClO (100 mL de 0,5 y 1,5 % p/p) durante 30 minutos (manteniendo el pH entre 9 – 9,5 utilizando H₂SO₄ 1N), una vez agregado el NaClO se permitió una reacción según el tiempo indicado en cada tratamiento (40 y 90 minutos) (Manteniendo el pH entre 9 – 9,5 utilizando NaOH 1N). Luego de haber terminado la reacción se adicionó 1 g de bisulfito de sodio, seguidamente se filtró 3 veces (hasta que el líquido efluente fue claro). Posteriormente se secó el almidón en la estufa a 45 °C durante 48 horas. Finalmente se molió el almidón y se tamizó en una malla N° 50.

Determinación de grado de sustitución de grupos carboxilo. Se pesó 2 g de almidón oxidado y nativo en un vaso de precipitado de 250 mL, se adicionó 25 mL de HCl 0,1N y se mezcló con un agitador magnético durante 30 minutos. Posteriormente se filtró al vacío, y la pasta se transfirió a un Erlenmeyer de 500 mL el cual contuvo 300 mL de agua destilada. Se calentó a ebullición durante 15 min con agitación constante. Al finalizar el tiempo se adicionó 150 mL de agua destilada a temperatura ambiente y se permitió estabilizar a una temperatura entre 34 y 39 °C. Finalmente se tituló a pH de 8,3 con NaOH 0,01N, utilizando un pHmetro. El porcentaje de grupos carboxilos se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mequi. de acidez}}{100 \text{ g de almidón}} = \frac{(A - B) * N \text{ NaOH} * 100}{\text{Gramos de la muestra}}$$

$$\% \text{Carboxilo} = \frac{\text{mequi. de acidez}}{100 \text{ g de almidón}} * 0,045 \text{ (Ec. 8)}$$

Donde:

A: mL muestra, mL de NaOH 0,01 N gastados en la titulación de almidón oxidado.

B: mL blanco, mL de NaOH 0,01N gastados en la titulación de almidón nativo.

0,045: miliequivalente del grupo carboxilo.

Temperatura de gelatinización. Para su determinación se pesó 10 g de cada almidón en un vaso de precipitado de 250 mL, se realizó una suspensión con 100 mL de agua destilada, adicionalmente en un vaso de precipitado de 250 mL se calentó 100 mL de agua hasta 85 °C, posterior a ello, se tomó 50 mL de la suspensión de almidón en un vaso de precipitado de 100 mL y se introdujo en el baño de agua caliente, finalmente se agita la suspensión constantemente con el termómetro hasta que se forme una pasta y la temperatura permanezca estable por unos segundos, en ese momento se tomó la lectura (Aristizábal y Sánchez, 2007).

Índice de absorción de agua (IAA). Se pesaron tubos de centrifuga secos a 60 °C. Seguidamente se pesó en los tubos 0,5 g de almidón (b.s.) y se agregó exactamente 12 mL de agua destilada precalentada a 60 °C y se agitó (sin excederse). Posteriormente se colocó en baño de agua a 60 °C durante 30 minutos; agitando la suspensión a los 10 minutos de haber iniciado el calentamiento. Luego se centrifugó a temperatura ambiente a 4900 RPM durante 30 minutos. Seguidamente se decantó el sobrenadante inmediatamente después de centrifugar (máximo un minuto después) y se pesó el tubo de centrifuga con el gel. Finalmente se determinó el IAA mediante la siguiente ecuación.

$$IAA = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso muestra (g)}} \text{ (Ec. 9)}$$

Diseño experimental. Se utilizó un diseño factorial 2^k , donde k es el número de variables independientes, que en este caso son dos (concentración de NaClO y tiempo de oxidación), evaluando su efecto en tres variables dependientes (grado de sustitución, IAA y temperatura de gelatinización) (Tabla 2).

Tabla 2
Variables de estudio

Variable	Unidades	Clase
Grado de sustitución de grupos carboxilo	%p/p	Dependiente
Temperatura de gelatinización	°C	Dependiente
IAA	g gel/g almidón	Dependiente
Tiempo de oxidación	min	Independiente
Concentración de NaClO	%p/p	Independiente

La Tabla 3 presenta los niveles de cada variable independiente, así como su valor codificado.

Tabla 3
Valores utilizados en el diseño factorial 2^k para dos factores

Variables	Nivel	
	-1	1
X ₁ NaClO (%p/p)	0,5	1,5
X ₂ Tiempo de oxidación (min)	40	90

En la Tabla 4 se presenta el diseño de experimentos utilizado. Se realizó un planeamiento factorial 2^2 lo que nos dio un total de cuatro tratamientos a realizar. Utilizando el programa Statistica 10, se realizó un ANOVA para cada variable dependiente, determinándose los efectos de los factores, obteniéndose modelos de regresión (Ec. 10) y los análisis de varianza de dichos modelos, los cuales sirven para evaluar si estos estiman adecuadamente las respuestas (Montgomery, 2004).

$$Y = aX_1 + bX_2 + c \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:
Y: (Y₁: Grados de sustitución de grupos carboxilo (%); Y₂: Temperatura de gelatinización (°C); Y₃: IAA (g gel/g almidón)); a, b y c = Coeficientes de regresión; X₁, X₂ = variables independientes.

Finalmente se construyeron superficies de respuesta para definir las regiones de interés.

Tabla 4
Diseño del experimento

	Valor codificado		Valor real	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
T1	-1	-1	0,5	40
T2	1	-1	1,5	40
T3	-1	1	0,5	90
T4	1	1	1,5	90

T: Tratamiento; X₁: Concentración de hipoclorito de sodio (%p/p); X₂: Tiempo de oxidación (min).

3. Resultados y discusión

Parámetros fisicoquímicos del almidón nativo de achira. Los valores de la Tabla 5 están de acuerdo con los reportados por Santacruz et al. (2012), quienes obtuvieron para la humedad y temperatura de gelatinización del almidón de Achira, 11% y 58,9 a 73,7 °C, respectivamente.

Tabla 5
IAA y temperatura de gelatinización de almidón nativo de achira

Parámetro	Valor
Humedad	11,8%
Temperatura de gelatinización	68 °C
IAA	7,05 g de gel/g almidón

Por otro lado el IAA está de acuerdo con lo reportado por Andrade-Mahecha et al. (2012), quien obtuvo valores de 5 a 10 g de gel/g almidón de Achira, para una temperatura de alrededor de 60 °C.

Grado de sustitución de grupos carboxilo, temperatura de gelatinización e IAA. Los valores de grado de sustitución de grupo carboxilo, temperatura de gelatinización e IAA de las muestras se exponen en la Tabla 6. Como se observa, las concentraciones altas de NaClO produjeron un incremento del grado de sustitución de los grupos carboxilo. La tendencia del incremento del grado de sustitución puede deberse a que a una concentración mayor del oxidante y a tiempos mayores se podría generar una mayor oxidación de las moléculas de glucosa con la consiguiente formación de un mayor número de grupos carboxilo, este resultado guarda relación con los resultados obtenidos por Zhang et al. (2009), quienes afirman que, a una mayor relación de oxidante con respecto al almidón nativo, se origina el incremento de más grupos carboxilo.

El tiempo también tiene un papel muy importante en el grado de sustitución de grupos carboxilos en este sentido, Sánchez (2004) indica que los almidones que se oxidan a una concentración de NaClO de 0,5 %p/p y aun tiempo de 60 min obtienen una mejor modificación del almidón oxidado, con mejores cualidades.

Tabla 6
Resultados del grado de sustitución de grupos carboxilo, temperatura de gelatinización e IAA

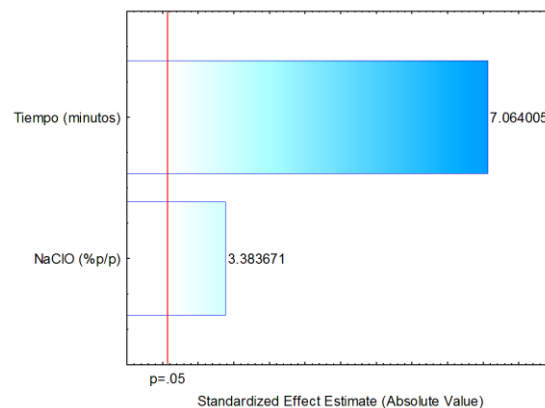
Ensayo	X1	X2	Y1	Y2	Y3
	NaClO (%p/p)	Tiempo de oxidación (min)	Grados de sustitución (%)	Temperatura de gelatinización (°C)	IAA (g gel/g almidón)
T1	0,5	40	0,0248	66,0	7,14
T2	1,5	40	0,0450	67,0	4,80
T3	0,5	90	0,0664	66,5	4,45
T4	1,5	90	0,0855	67,2	2,70

Arenas y Pedraza (2017) modificaron almidón de papa trabajando a un tiempo de oxidación de 60 minutos y una concentración de cloro activo de 0,5 a 1 %p/p, presentando un grado de sustitución de grupos carboxilo de 0,002 – 0,045 %, observando una tendencia similar a nuestros resultados. En cuanto a la temperatura de gelatinización, esta constituye una propiedad química muy importante relacionada con el proceso en que el gránulo del almidón por acción del calor empieza a hidratarse. Los valores de temperatura de gelatinización variaron entre 66 y 67,2 °C, siendo estos menores con respecto al almidón nativo que fue de 68 °C (Tabla 5), por otro lado, entre los tratamientos no se observan diferencias claras entre los valores de temperatura de gelatinización, sin embargo Xiao et al. (2012) observó una disminución de la temperatura de gelatinización al oxidar almidón de arroz, este comportamiento podría deberse a que la oxidación debilita las uniones intermoleculares de las cadenas de almidón facilitándose la hidratación. Por otro lado los valores de IAA descendieron desde 7,14 a 2,70 g gel/g almidón al aumentar el tiempo o la concentración de hipoclorito de sodio, además de ser valores inferiores al encontrado en el almidón nativo (7,05 g de gel/g almidón), excepto en el tratamiento más suave (T1) estos resultados están de acuerdo con los reportados por Kaur y Bhullar (2016) al oxidar almidón de grano de Tamarindo a diferentes niveles de concentración de hipoclorito de sodio, esto se debería a que cuando se oxida el almidón se produce una degradación de los polímeros de éste, formándose fragmentos que generalmente son solubles en agua, lo que resulta en una menor capacidad para retener el agua.

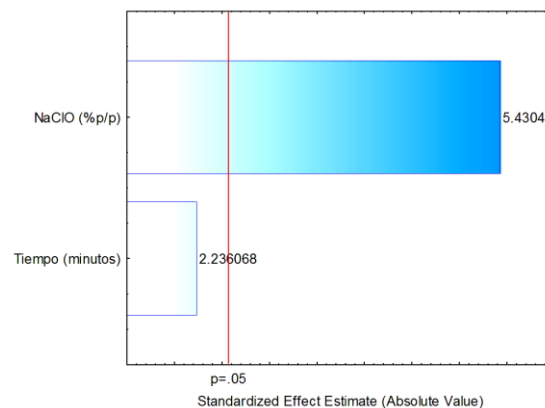
Análisis de efectos y regresión. En la Figura 4 se muestra el análisis de los efectos para el grado de sustitución de grupos carboxilo, temperatura de gelatinización e IAA. Como se observa en la Figura 4a, el tiempo de oxidación y la concentración de NaClO tuvieron un efecto significativo sobre el grado de sustitución de grupos carboxilo, siendo el efecto del tiempo mayor, esto está de acuerdo con lo reportado por Fonseca et al. (2015), quienes apenas encontraron diferencias significativas en el grado de sustitución de grupos carboxilo al pasar de una concentración de 0,5 a 1,5% de hipoclorito de sodio durante la oxidación de almidón de papa, por otro lado Yuniar et al. (2019) encontraron un mayor efecto del tiempo de oxidación sobre el grado de sustitución de grupos carboxilo al tratar almidón de Sagu por un tiempo de 30 a 90 min, utilizando hipoclorito de sodio a una concentración de 0,74 g/ 100 mL. Según la Figura 4b la concentración de NaClO tiene efecto significativo mientras que el tiempo de oxidación no

tiene efecto significativo sobre la temperatura de gelatinización de los almidones oxidados, existen informaciones contradictorias al respecto, pues algunos autores mencionan que al incrementar levemente la concentración de NaClO no se tiene una clara tendencia del comportamiento de la temperatura de gelatinización, tal como lo reporta Fonseca et al. (2015) y Sukhija et al. (2017), por lo tanto estos resultados poco claros se deberían a la estrecha diferencia entre los niveles considerados para la concentración de hipoclorito.

a



b



c

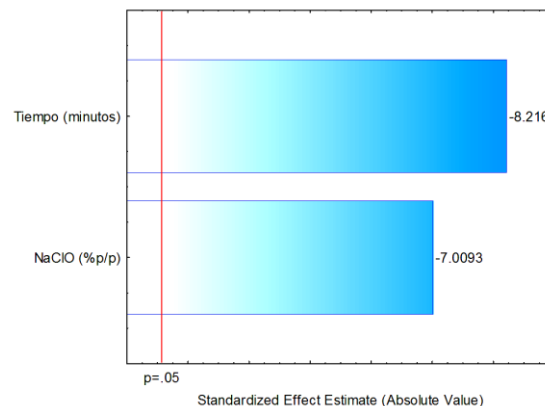


Figura 4. Análisis de los efectos para: a) Grado de sustitución de grupos carboxilo, b) Temperatura de gelatinización y c) IAA.

Por otro lado, tanto la concentración de NaClO y el tiempo de oxidación presentan efecto significativo sobre el IAA (Figura 4c), así, a medida que se incrementa cualquiera de los parámetros existe una reducción del IAA, teniendo el tiempo de oxidación un mayor efecto reductor. Esto está de acuerdo con Yuniar et al. (2019) quien observó este comportamiento al oxidar almidón de Sagu a diferentes tiempos de oxidación.

Los coeficientes de regresión (Tabla 7) permitieron elaborar los siguientes modelos matemáticos:

$$Y_1 = 0,0196 \cdot X_1 + 0,0008 \cdot X_2 - 0,0177$$

$$Y_2 = 0,85 \cdot X_1 + 0,007 \cdot X_2 + 65,37$$

$$Y_3 = -2,0416 \cdot X_1 - 0,0479 \cdot X_2 + 9,9262$$

Donde: Y₁ = Grado de sustitución de grupos carboxilo (%); Y₂ = Temperatura de gelatinización (°C); Y₃ = IAA (g gel/g almidón); X₁ = Concentración de hipoclorito de sodio (%p/p); X₂ = Tiempo (minutos).

Tabla 7

Coefficientes de regresión para el grado de sustitución de grupos carboxilos temperatura de gelatinización e IAA

Factor	Grado de sustitución de grupos carboxilos		Temperatura de gelatinización		Índice de absorción de agua (IAA)	
	CR	p	CR	p	CR	p
Mean/ Interc.	-0,018	0,1367	65,370	0,0001	9,926	0,0001
(1) NaClO (%p/p)	0,020	0,0196	0,850	0,0029	-2,042	0,0009
(2) Tiempo (min)	0,001	0,0009	0,007	0,0756	-0,048	0,0004

CR: coeficiente de regresión.

En la Tabla 8 se muestra el análisis de varianza para los modelos anteriormente descritos. Los modelos resultan ser significativos, es decir, los modelos son adecuados para describir los resultados a través de la superficie de respuesta, se puede afirmar que existe una buena concordancia entre los valores experimentales y los previstos por los modelos.

Tabla 8

Análisis de varianza para los modelos

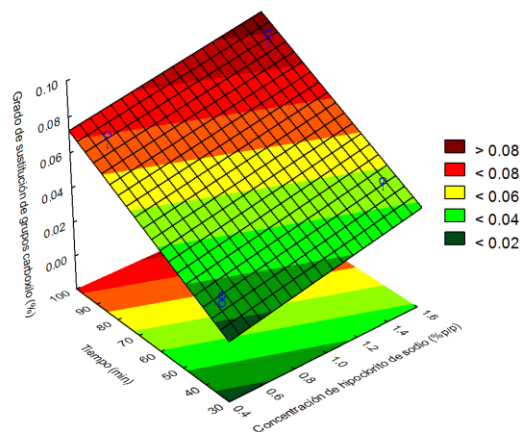
	SC	GL	CM	Fcal	p
GSG					
Modelo	0,0042	2	0,00207	30,67	0,0016
Residuos	0,0003	5	0,00007		
Total	0,0045	7			
TG					
Modelo	1,690	2	0,845	17,24	0,0057
Residuos	0,245	5	0,049		
Total	1,935	7			
IAA					
Modelo	19,792	2	9,896	58,32	0,0003
Residuos	0,848	5	0,170		
Total	20,640	7			

Grado de sustitución de grupos carboxilo (GSG): R²= 0,9246; Adj: 0,8945. Temperatura de gelatinización (TG): R²= 0,8734; Adj: 0,8227. Índice de absorción de agua (IAA): R²= 0,9589; Adj: 0,9425. Ftab=5,79.

Los valores de R² de las ecuaciones polinómicas de primer orden obtenidos indicaban que el modelo del grado de sustitución de grupos carboxilos podía explicar el 92,42% de la variabilidad de los resultados, mientras que el modelo para la temperatura de gelatinización explicaba solo el 87,34% de los mismos, por otro lado, el modelo que mejor explicaba la variabilidad de los resultados fue el de IAA con un 95,89%. Los altos valores de los coeficientes de determinación R², muestran una estrecha concordancia entre los resultados experimentales obtenidos y los valores predichos por los modelos polinómicos (Ferreira et al., 2003; Abdel et al., 2005).

Gráficas de superficie de respuesta. Como se pudo observar en el análisis de varianza, los modelos son significativos para la respuesta del grado de sustitución de grupos carboxilo, temperatura de gelatinización e IAA, siendo posible construir superficies de respuesta y estudiar el comportamiento de dicha respuesta en función del cambio de los factores (Figuras 5, 6 y 7).

(a)



(b)

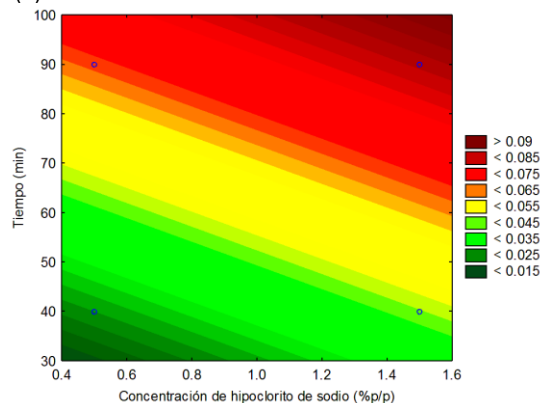


Figura 5. (a) Superficie de respuesta; (b) Grafica de contornos para el grado de sustitución de grupos carboxilo.

En la [Figura 5](#) se observa la superficie de respuesta y curva de contorno para el grado de sustitución de grupos carboxilo, se aprecia que cuando los valores de tiempo oscilan entre 30 y 40 minutos, y la concentración de hipoclorito de sodio entre 0,4 y 0,6 %p/p, la sustitución de grupos carboxilos alcanza valores por debajo de 0,025 %, por otro lado si la concentración de hipoclorito está entre 1,5 y 1,6% y la temperatura de oxidación entre 90 y 100 ocurre una sustitución por encima de 0,08%, la elección de una área u otra dependerá de las características del almidón que se desee obtener, por ejemplo [Fonseca et al. \(2015\)](#) menciona que los almidones más sustituidos podrían utilizarse en películas protectoras para conservar alimentos con alta actividad de agua, pues estos almidones son menos permeables y menos solubles en agua que los almidones nativos.

(a)

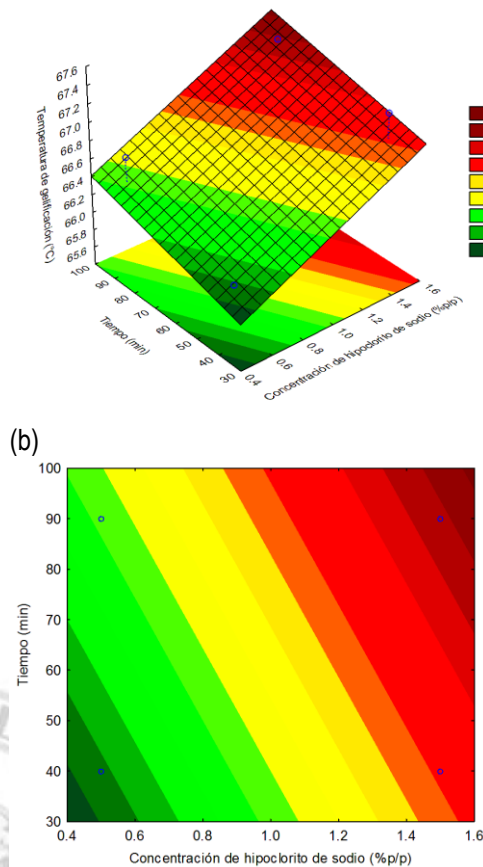


Figura 6. (a) Superficie de respuesta; (b) Grafica de contornos para la temperatura de gelatinización.

En la [Figura 6](#) se verifica que cuando se disminuye la concentración de hipoclorito de sodio por debajo de 0,5 %p/p y el tiempo se mantiene entre 30 y 40 minutos la temperatura de gelatinización alcanza valores que estarían por debajo de 66 °C, sin embargo, como ya se discutió anteriormente este comportamiento se debería a que los niveles de

concentración de hipoclorito están muy cercanos y no permiten tener una clara tendencia en la temperatura de gelatinización, esto puede explicarse en parte por los bajos valores de coeficiente de determinación obtenidos para el modelo de regresión de la temperatura de gelatinización. Para posteriores investigaciones se deberían tomar niveles de concentración de hipoclorito más amplios a fin de ver la tendencia de la temperatura de gelatinización.

En la [Figura 7](#) se observa la superficie de respuesta y curva de contorno que permite definir las condiciones más adecuadas para el índice de absorción de agua (IAA), se observa que cuando los valores de tiempo oscilan entre 30 y 40, y la concentración de hipoclorito de sodio entre 0,4 y 0,5 %p/p, el IAA alcanza valores superiores a 7 gel/g de almidón, similar al almidón nativo, por lo tanto si se quiere mantener las propiedades altas de IAA de agua se debería elegir condiciones suaves de oxidación, esto es importante por ejemplo en algunas aplicaciones en las que se quiere mantener una alta viscosidad, mejorando propiedades como la claridad y la resistencia a la retrogradación ([Bonilla et al., 2013](#)).

(a)

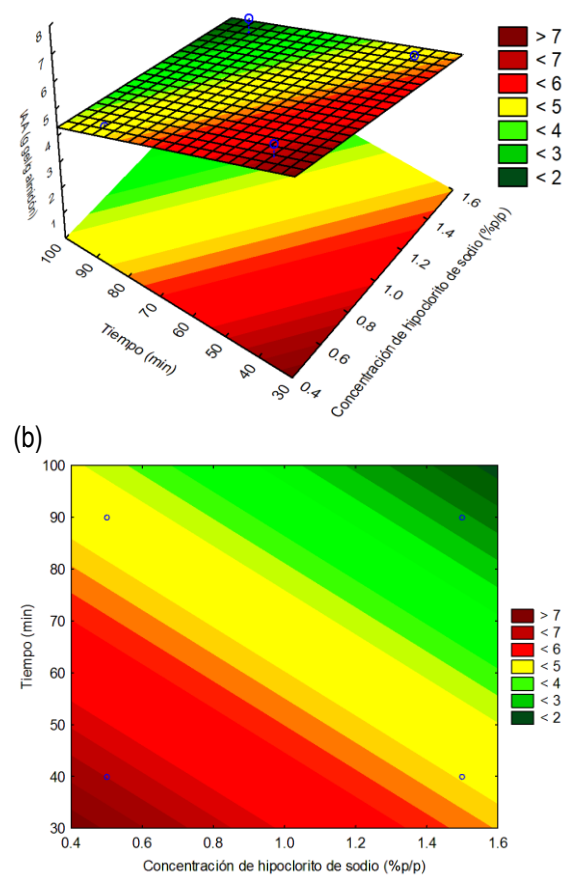


Figura 7. (a) Superficie de respuesta; (b) Gráfica de contornos para el IAA.

4. Conclusiones

Es posible generar un almidón oxidado a partir de los rizomas de Achira (*Canna edulis* Ker), observándose que a menor concentración de hipoclorito de sodio y tiempo de oxidación se obtenían una disminución en el grado de sustitución de grupos carboxilo y un incremento en el índice de absorción de agua, la temperatura de gelatinización permaneció sin una tendencia clara entre los tratamientos, pero registró una notable disminución con respecto al almidón nativo. El almidón de Achira oxidado podría servir de materia prima para la elaboración de productos que requieran una temperatura de gelatinización más baja, manteniendo una viscosidad adecuada.

Referencias bibliográficas

- Abdel, Y.; Saeed, H.; Gohar, Y.; Baz, M. 2005. Improved production of Pseudomonas aeruginosa uricase by optimization of process parameters through statistical experimental designs. Proc. Biochem. 40: 1707-1714.
- Acuña, H. 2012. Extracción, caracterización y aplicación de almidón de ñame variedad blanco (*Dioscorea trifida*) originario de la región amazónica colombiana para la elaboración de productos horneados. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Colombia. 64 pp.
- Alarcón, M.; Dufourd, D. 1998. Almidón agro de yuca en Colombia: Tomo1: Producción y recomendaciones. 1era Edición. Centro internacional de agricultura tropical. Cali, Colombia. 35 pp.
- Andrade-Mahecha, M.M.; Tapia-Blácido, D.R.; Menegalli, F.C. 2012. Physical-chemical, thermal, and functional properties of achira (*Canna indica* L.) flour and starch from different geographical origin. Starch/Staerke 64(5): 348-358.
- Arenas, C.; Pedraza, D. 2017. Evaluación del proceso de modificación de almidón de papa mediante acetilación y oxidación, para su aplicación, excipiente en la industria farmacéutica al nivel de laboratorio. Tesis de pregrado, Universidad de América, Bogotá. Colombia. 119 pp.
- Aristzábal, J.; Sánchez, T. 2007. Guía técnica producción y análisis de almidón de yuca. 1ra edición. FAO. Roma, Italia. 134 pp.
- Ashogbon, A.; Akintayo, E. 2014. Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. Starch 66(1): 41-57.
- Badui, S. 2012. Química de los Alimentos. 5ta Edición. Editorial Pearson. México, Mexico. 744 pp.
- Bertolini, A. 2010. Starches. Characterization, Properties, and Applications. 1ra. Edición. Editorial Taylor & Francis Group. Boca Raton, Estados Unidos. 288 pp.
- Betancur-Ancona, D. 2001. Caracterización molecular, nutricional y funcional de almidones de *Phaseolus lunatus* y *Mucuna pruriens*. Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, México. México. 120 pp.
- Bonilla, R.; Hoyos, J.; Velasco, R. 2013. Efecto de oxidación de almidón de yuca sobre propiedades mecánicas y térmicas de películas biodegradables. Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial 11: 208-217.
- Champe. 2011. Modificación del almidón de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Brancott) por métodos oxidativos para uso alimentario. Tesis de pregrado. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. Perú. 100 pp.
- Chen, Q.; Yu, H.; Wang, L.; Abdin, Z.; Chen, Y.; Wang, J.; Zhou, W.; Yang, X.; Khan, R.; Zhang, H.; Chen, X. 2015. Recent progress in chemical modification of starch and its applications. The Royal Society of Chemistry 5(83): 67459-67474.
- Ferreira, S.; Correia, A.; Da Fonseca, M. 2003. Response surface modeling of glycerolysis catalyzed by *Candida rugosa* lipase immobilized in different polyurethane foams for the production of partial glycerides. Jour. Mol. Catal. B: Enzymtic 21: 71-80.
- Fonseca, L.M.; Gonçalves, J.R.; El Halal, S.L.M.; Pinto, V.Z.; Dias, A.R.G.; Jacques, A.C.; Zavareze, E.daR. 2015. Oxidation of potato starch with different sodium hypochlorite concentrations and its effect on biodegradable films. LWT - Food Science and Technology 60(2): 714-720.
- González, A.; Olguín N.; Loayza E.; Severich, E. 2014. Almidón Nativo y Modificado, obtención, cuantificación, modificación y usos. Tesis de pregrado. Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno. Facultad de Ciencias farmacéutica y bioquímica. Santa Cruz de la sierra. Bolivia. 120 pp.
- Guo, Q.; Wang, Y.; Fan, Y.; Liu, X.; Ren, S.; Wen, Y.; Shen, B. 2015. Synthesis and characterization of multi-active site grafting starch copolymer initiated by KMnO4 and HIO4/H2SO4 system. Carbohydrate Polymers 117: 247-25.
- Hernández-Medina, M.; Torruco-Uco, G.; Chel-Guerrero, L.; Betancur-Ancona, D. 2008. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. Cienc. Tecnol. Aliment., Campinas 28(3): 718-726.
- Kaur, M.; Bhullar, G.K. 2016. Partial Characterization of Tamarind (*Tamarindus indica* L.) Kernel Starch Oxidized at Different Levels of Sodium Hypochlorite. International Journal of Food Properties 19(3): 605-617.
- Lozano, C.; Mendoza, S.; Garrido, E. 2013. Caracterización funcional de almidón catiónico de yuca (*Manihot esculenta*). Revista ION 26(2): 31-38.
- Montgomery, D. 2004. Diseño y análisis de experimentos. 2da Edición. Limusa Wiley. México, México. 692 pp.
- Rodríguez, G.; García, H.; Camacho, J.; Arias, F. 2003. Almidón de achira o sagú (*Canna edulis*). Manual técnico para su elaboración. 1ra Edición. Corporación colombiana de investigación agropecuaria. Tibaitatá, Colombia. 33 pp.
- Sánchez, M. 2004. Modificación por oxidación del almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y su caracterización parcial. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Yaupetec. México. 95 pp.
- Sangseethong, K.; Termvejsayanon, N.; Siroth, K. 2010. Characterization of physicochemical properties of hypochlorite and peroxide oxidized cassava starches. Carbohydrate Polymers. 82: 446-453.
- Santacruz, S.; Pennanen, M.; Ruales, J. 2012. Protein enrichment of oriental noodles based on *Canna edulis* starch. Revista Boliviana de Química 29(1): 97-110.
- Sarmiento, C. 2016. Propuesta de desarrollo de un recetario de postres a base de achira y rosas comestibles. Tesis de pregrado. Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias de la hospitalidade, Cuenca. Ecuador. 83 pp.
- Singh, N.; Kaur, L.; Sodhi, N.; Sekhon, K. 2005. Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars. Food Chemistry 89(2): 253-259.
- Steve, W. 2005. Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications. 1 ra. Edition. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, USA. 407 pp.
- Sukhija, S.; Singh, S.; Riar, C.S. 2017. Molecular characteristics of oxidized and cross-linked lotus (*Nelumbo nucifera*) rhizome starch. International Journal of Food Properties 20(1): S1065-S1081.
- Xiao, H.X.; Lin, Q.L.; Liu, G.Q.; Yu, F.X. 2012. A comparative study of the characteristics of cross-linked, oxidized and dual-modified rice starches. Molecules 17(9): 10946-10957.
- Yuniar; Margaretty, E.; Aneasari, F.; Febriana, I. 2019. The Effect of Reaction Time and pH on the Process of Sago Starch. Journal of Physics: Conference Series 1167: 012053
- Zhang, S.; Zhang, Y.; Wang, X.; Wang, Y. 2009. High Carbonyl Content Oxidized Starch Prepared by Hydrogen Peroxide and Its Thermoplastic Application. Starch 61(11): 646-655.