



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS,
FÍSICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DEL ALMIDÓN DE TRES
VARIETADES DE CAÑIHUA (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) DE
LA REGION PUNO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ERIKA AMELIA SAYRA CHURATA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

A Dios, por ser generoso y bueno.

A mi querida mamá Margarita, por su amor infinito, por ser mi motor y motivo para seguir adelante y poder cumplir cada uno de mis objetivos, y que junto a mi hermana Luz Marina desde el cielo cuidan y protegen a mi familia.

A mi querido papá Nazario por su cariño y preocupación, mi ejemplo de responsabilidad, gracias a su esfuerzo y trabajo me brindó todo lo que necesitaba.

A mis queridos hermanos Edgar, Alex, Sonia y Beatriz, por transmitirme siempre fortaleza y su apoyo incondicional, cada uno de forma única y especial me enseñaron a seguir adelante a pesar de las adversidades y obstáculos para que más adelante, tenga esa suficiente capacidad de superación. Toda mi admiración para ustedes.

A mis sobrinitas y sobrinitos quienes me muestran que los pequeños detalles son los más valiosos.

Por siempre y para siempre en mi corazón.

Erika Amelia Sayra Churata

Marzo, 2021



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por impartirme todos los conocimientos durante mis estudios de pregrado y contribuir en mi formación profesional.

A mi directora de tesis, Dra. Alicia Magaly Leon Tacca, por su asesoría e invaluable apoyo, por siempre tener la disposición de tiempo para compartir sus experiencias y conocimientos, pero además de eso, muy agradecida con usted por confiar en mí.

Al Dr. Wenceslao Medina Espinoza, ex vicerrector de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, por su apoyo e interés en esta investigación, además, por brindarme la oportunidad de ser parte del Subproyecto de investigación: 133 – 2018 – FONDECYT- BM- IADT- AV, mediante el cual se logró el financiamiento de la presente investigación.

A mis jurados de tesis, M.Sc. César Paul Laqui Vilca, Dr. Ronald Astete Tebes, M.Sc. Juan Quispe Ccama, por la dedicación, orientación y apoyo en la presente investigación.

A todos mis amigos y amigas por su cariño y apoyo en todo momento. A todos ustedes mi mayor gratitud.

Erika Amelia Sayra Churata

Marzo, 2021



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESÚMEN..... 12

ABSTRACT..... 13

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO GENERAL..... 15

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 15

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CAÑIHUA 16

2.1.1 Nombres comunes..... 17

2.1.2 Clasificación taxonómica..... 17

2.1.3 Variedades 18

2.1.3.1 Variedad Cupi 18

2.1.3.2 Variedad Ramis..... 19

2.1.3.3 Variedad Illpa INIA 19

2.2 ALMIDÓN..... 20



2.2.1 Características fisicoquímicas del almidón.....	20
2.2.1.1 Contenido de amilosa y amilopectina.....	22
2.2.2 Propiedades funcionales del almidón	24
2.2.2.1 Poder de hinchamiento, índice de solubilidad en agua, capacidad de absorción de agua	24
2.2.3 Reología.....	25
2.2.4 Reología en alimentos.....	25
2.2.4.1 Clasificación reológica de los alimentos	26
2.2.4.1.1 Fluidos Newtonianos	27
2.2.4.1.2 Fluidos no Newtonianos independientes del tiempo	28
2.2.4.1.3 Fluidos no Newtonianos dependientes del tiempo	31
2.2.4.1.4 Fluidos no Newtonianos viscoelásticos	32
2.2.5 Constantes reológicas fundamentales	33
2.2.6 Análisis reológico	34
2.2.6.1 Barrido de deformación	34
2.2.6.2 Barrido de frecuencia.....	35
2.2.6.3 Barrido de temperatura	37
2.2.6.4 Comportamiento de flujo o curva de fluidez	37
2.3 ALMIDÓN DE CAÑIHUA	38

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución.....	39
------------------------------------	-----------



3.2 Material biológico	39
3.3 Materiales	39
3.4 Equipos	40
3.5 Reactivos	40
3.6 Software	40
3.7 Métodos de análisis	41
3.7.1 Caracterización fisicoquímica.....	41
3.7.1.1 Distribución de Tamaño de Partícula (DTP)	41
3.7.1.2 Determinación de amilosa y amilopectina.....	41
3.7.2 Propiedades funcionales	41
3.7.2.1 Poder de hinchamiento (PH), Índice de solubilidad en agua (IS) y Capacidad de absorción de agua (CAA)	41
3.7.3 Comportamiento reológico	42
3.7.3.1 Barrido de temperatura	42
3.7.3.2 Barrido de frecuencia.....	42
3.7.3.3 Curva de fluidez y Viscosidad	43
3.8 Metodología experimental.....	43
3.8.1 Extracción del almidón de cañihua	43
3.9 Modelo estadístico.....	45

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización fisicoquímica de los almidones de cañihua.....	47
---	-----------



4.1.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP).....	47
4.1.2 Contenido de amilosa y amilopectina.....	48
4.2 Propiedades funcionales de los almidones de cañihua	50
4.2.1 Poder de hinchamiento (PH), Índice de solubilidad en agua (IS) y Capacidad de absorción de agua (CAA)	50
4.3 Comportamiento Reológico	53
4.3.1 Barrido de temperatura	53
4.3.2 Barrido de frecuencia.....	57
4.3.3 Curva de fluidez y Viscosidad	63
V. CONCLUSIONES.....	69
VI. RECOMENDACIONES	71
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
ANEXOS.....	84

Área : Ingeniería y Tecnología

Tema : Propiedades físicas y estructurales

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 15 de marzo del 2021



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de amilosa y amilopectina.....	22
Tabla 2. Distribución de tamaño de partícula de los almidones de cañihua	47
Tabla 3. Contenido de amilosa y amilopectina de los almidones de cañihua.....	48
Tabla 4. Poder de hinchamiento de los almidones de cañihua	53
Tabla 5. Porcentaje de índice de solubilidad en agua de los almidones de cañihua.....	53
Tabla 6. Capacidad de absorción de agua de los almidones de cañihua.....	53
Tabla 7. Temperatura de formación de gel de los almidones de cañihua.....	54
Tabla 8. Parámetros reológicos de almidón de cañihua (Cupi, Illpa INIA y Ramis) a diferentes suspensiones cañihua: agua (1:9; 2:8 y 3:7).....	65



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Granos de cañihua: (a) con perigonio, (b) sin perigonio.....	17
Figura 2.	Planta de cañihua de la variedad Cupi.....	18
Figura 3.	Planta de cañihua de la variedad Ramis	19
Figura 4.	Planta de cañihua de la variedad Illpa INIA	20
Figura 5.	Representación esquemática de la estructura granular de almidón desde los anillos de crecimiento hasta la amilopectina.....	23
Figura 6.	Reograma de fluidos independientes del tiempo.....	29
Figura 7.	Reograma de fluidos dependientes del tiempo.....	32
Figura 8.	Diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón de cañihua.....	44
Figura 9.	Espectros mecánicos en función de la frecuencia angular a suspensión 1:9 (cañihua: agua) del almidón de tres variedades de cañihua. A. módulo de almacenamiento, G' (Pa); y, B. módulo de pérdida, G'' (Pa). almidón Cupi (\square), almidón Illpa INIA (\diamond) y almidón Ramis (Δ).	60
Figura 10.	Espectros mecánicos en función de la frecuencia angular a suspensión 2:8 (cañihua: agua) del almidón de tres variedades de cañihua. A. módulo de almacenamiento, G' (Pa); y, B. módulo de pérdida, G'' (Pa). almidón Cupi (\square), almidón Illpa INIA (\diamond) y almidón Ramis (Δ).	60
Figura 11.	Espectros mecánicos en función de la frecuencia angular a suspensión 3:7 (cañihua: agua) del almidón de tres variedades de cañihua. A. módulo de almacenamiento, G' (Pa); y, B. módulo de pérdida, G'' (Pa). almidón Cupi (\square), almidón Illpa INIA (\diamond) y almidón Ramis (Δ).	60
Figura 12.	Factor de pérdida en función de la frecuencia angular para almidones de cañihua (Cupi, Illpa INIA y Ramis) a suspensiones 1:9; 2:8 y 3:7.	62



Figura 13. Viscosidad en función de la velocidad de deformación para almidones de cañihua (Cupi, Ilpa INIA y Ramis) a suspensiones 1:9; 2:8 y 3:7..... 65



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

σ	: Esfuerzo de corte (Pa).
σ_0	: Esfuerzo o umbral de fluencia (Pa).
γ	: Velocidad de deformación (s^{-1}).
n	: Índice de comportamiento de flujo (adimensional).
K	: Coeficiente de consistencia ($Pa \cdot s^n$).
G'	: Módulo de almacenamiento (Pa).
G''	: Módulo de pérdida (Pa).
ω	: Frecuencia angular (rad/s).
PH	: Poder de hinchamiento (g/g).
IS	: Índice de solubilidad en agua (%).
CAA	: Capacidad de absorción de agua (g/g).
DTP	: Distribución de tamaño de partícula
R^2	: Coeficiente de determinación.
μm	: Micrómetro



RESÚMEN

Se determinó el comportamiento reológico, las características fisicoquímicas y las propiedades funcionales de los almidones extraídos de cañihua procedentes de la región Puno, Perú; las variedades utilizadas fueron las denominadas Cupi, Illpa INIA y Ramis. Se realizaron análisis fisicoquímicos de contenido de amilosa (13.0 – 14.2%), amilopectina (87.0 – 85.8%), así como, distribución de tamaño de partícula (~75 μm). En cuanto a las propiedades funcionales evaluadas en un rango de temperatura de 45°C–75°C, los valores de PH, ÍS y CAA, aumentaron a medida que la temperatura ascendía, es así que, a 75°C, el almidón de cañihua de la variedad Cupi presentó mayor PH (15.07 g/g) y mayor CAA (11.25 g/g), mientras que el almidón de cañihua de la variedad Ramis presentó mayor porcentaje de IS (27.92%). El comportamiento reológico con respecto a los barridos de temperatura, indican que en promedio la temperatura de gelatinización del almidón de las tres variedades de cañihua a las suspensiones almidón: agua 1:9, 2:8 y 3:7 son de 49.73°C, 46.07°C y 45,67 °C respectivamente. En cuanto al comportamiento viscoelástico, determinado mediante barrido de frecuencia, el almidón de las tres variedades de cañihua en las tres suspensiones presentaron predominio del módulo elástico siendo $G' > G''$ y $\tan(\delta) < 1$, clasificándose a los geles de almidón a la suspensión 1:9 como debiles y las suspensiones 2:8 y 3:7 como fuertes. El análisis de curva de flujo, indicaron que los geles de almidón presentaron un comportamiento no newtoniano de naturaleza pseudoplastica.

Palabras Clave: cañihua, almidón, reología, fisicoquímicas, propiedades funcionales.



ABSTRACT

The rheological behavior, the physicochemical characteristics and the functional properties of the starches extracted of canihua from the Puno region, Peru were determined; the varieties used were the Cupi, Illpa INIA and Ramis. Physicochemical analyzes of amylose content (13.0 - 14.2%), amylopectin (87.0 - 85.8%), as well as particle size distribution ($\sim 75 \mu\text{m}$) were performed. Regarding the functional properties evaluated in a temperature range of $45^\circ\text{C} - 75^\circ\text{C}$, the values of PH, Í S and CAA, increased as the temperature rose, so that, at 75°C , the starch of canihua of the Cupi variety presented higher PH (15.07 g/g) and higher CAA (11.25 g / g), while the canihua starch of the Ramis variety presented a higher percentage of IS (27.92%). The rheological behavior with respect to the temperature sweeps indicates that on average the gelatinization temperature of the starch of the three varieties of canihua to the starch suspensions: water 1:9, 2:8 and 3:7 are 49.73°C , 46.07°C and 45.67°C respectively. Regarding the viscoelastic behavior, determined by frequency sweep, the starch of the three varieties of canihua in the three suspensions presented a predominance of the elastic modulus with $G' > G''$ and $\tan(\delta) < 1$, classifying the starch gels 1:9 suspension as weak and 2:8 and 3:7 suspension as strong. The flow curve analysis indicated that the starch gels presented a non-Newtonian behavior of a pseudoplastic nature.

Keywords: canihua, starch, rheology, physicochemical, functional properties.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) es originaria de los Andes del Sur del Perú y de Bolivia, fue domesticada por los pobladores de la cultura Tiahuanaco en la meseta del Collao. Se producen para la alimentación humana en altitudes entre 3800 y 4300 m.s.n.m. siendo muy resistente al frío en sus diferentes fases fenológicas (Hernández & León, 1992).

La cañihua es un notable grano nutritivo de las tierras alto andinas, rico en micronutrientes como el hierro y el calcio. Para personas quienes viven de la agricultura como subsistencia en el Altiplano, la cañihua es extremadamente importante como fuente principal de calorías y proteínas de buena calidad (National Research Council, 1989).

El componente principal de los granos andinos es el almidón (Steffolani et al. 2013), se ha reportado que el contenido de almidón de cañihua es de aproximadamente 51% de materia seca (National Research Council, 1989).

El almidón es el polisacárido alimentario más importante, abundante y digerible y, por lo tanto, es una fuente importante de energía en nuestras dietas, se utiliza para mejorar las características funcionales deseadas y se agregan en cantidades relativamente pequeñas a los alimentos como aditivos alimentarios; por ejemplo, el almidón se usa como espesante y gelificante, su análisis es de interés con respecto a aspectos regulatorios y una necesidad tecnológica porque puede modificar la reología de los productos en los que se incorporan (Peris-Tortajada, 2004).

Cuando el almidón se calienta en una cantidad excesiva de agua, ocurre la gelatinización, que implica la hinchazón del gránulo de almidón, la fusión de la región cristalina y la lixiviación de amilosa (Ai & Jane, 2015). Durante la gelatinización, la viscosidad del sistema cambia drásticamente y podría ser monitoreado por enfoques



reológicos (Li & Zhu, 2018). Se ha encontrado que los geles de almidón de diferentes fuentes, muestran comportamientos pseudoplásticos (Kong et al., 2010; Zhu et al., 2016; Zhu & Wang, 2012). Así mismo, el esfuerzo de fluencia está asociado con la textura de los alimentos y muestra significativas correlaciones con la calidad sensorial (Rao, 1999). El enfoque reológico se ha utilizado ampliamente para evaluar los comportamientos viscoelásticos de almidones de diversas fuentes botánicas (Kong et al., 2010; Ai & Jane, 2015; Zhu et al., 2016; Li et al., 2016; Singh et al., 2012). En la actualidad la base estructural del almidón de cañihua sigue siendo en gran medida desconocido, lo que dificulta recomendar futuras aplicaciones.

Dentro de este contexto, se plantean los siguientes objetivos:

1.1 OBJETIVO GENERAL

- ✚ Evaluar las características fisicoquímicas, propiedades funcionales y comportamiento reológico del almidón de tres variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) de la región de Puno.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ Determinar las características físicoquímicas del almidón de tres variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen).
- ✚ Determinar las propiedades funcionales del almidón de tres variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen).
- ✚ Determinar el comportamiento reológico del almidón de tres variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) a diferentes suspensiones.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CAÑIHUA

La cañihua es un notable grano nutritivo de las tierras alto andinas, rico en micronutrientes como el hierro y el calcio. Para personas quienes viven de la agricultura como subsistencia en el Altiplano, la cañihua es extremadamente importante como fuente principal de calorías y proteínas de buena calidad (National Research Council, 1989).

En el Perú, la mayor concentración de producción de cañihua se encuentra en el Altiplano de la Región Puno, principalmente en las provincias de Melgar (Distritos: Llalli, Macarí, Ayaviri, Nuñoa), Azángaro, Huancané, San Román, Puno (Distrito: Acora) y Chucuito (Distritos: Pomata y Kelluyo) (Apaza, 2010).

Los granos de cañihua no contienen saponina, son de forma subcilíndrico, cónico, sublenticular, subcónico y subelipsoidal de 1.0 a 1.2 mm de diámetro, el embrión es curvo y periforme, el epispermo muy fino y puntiagudo de color negro, castaño o castaño claro. (Apaza, 2010). El fruto está cubierto por el perigonio de color generalmente gris de pericarpio muy fino y translúcido. Las semillas no presentan dormancia y pueden germinar sobre la propia planta al tener humedad suficiente (Apaza, 2010). En la Figura 1 se puede apreciar el grano de cañihua con y sin perigonio.



(a)

(b)

Figura 1. Granos de cañihua: (a) con perigonio, (b) sin perigonio
Fuente: Huiche (2018).

2.1.1 Nombres comunes

Apaza (2010) indica que, la cañihua tiene una gran variedad de nombres locales dependiendo de la región. Algunos de los nombres por los cuales se le conoce son:

Quechua: “kañiwa”, “kañawa”, “kañahua”, “kañagua”, “quitacañigua”, “ayara”

Aymará: “iswallahupa”, “aharahupa”, “aara”, “ajara”, “cañahua”, “kañawa”.

2.1.2 Clasificación taxonómica

Según Apaza (2010), la taxonomía de la cañihua es la siguiente:

Reino: Vegetal

División: Angiospermyta

Clase: Dicotyledoneae

Sub clase: Archichlamydeae

Orden: Centrospermales

Familia: Chenopodiáceae

Género: *Chenopodium*

Especie: *Chenopodium pallidicaule* Aellen

2.1.3 Variedades

Astete (2002) sostiene que, la cañihua es considerada una especie de gran diversidad genética, de reproducción mixta, debido a su tasa estimada de autofecundación entre 64 y 89%.

El Instituto Nacional de Innovación Agraria ha realizado esfuerzos y aportes importantes en la obtención de variedades de cañihua a través de los métodos de selección individual y estudios de estabilidad de rendimiento, logrando obtener las variedades Cupi, Ramis e Illpa INIA (Apaza, 2010).

2.1.3.1 Variedad Cupi

Esta variedad alcanza una altura de 60 cm, donde el diámetro del tallo central es de 4.0 mm, con color de tallo púrpura pálido en madurez fisiológica, el cual se muestra en la Figura 2. El aspecto del perigonio del fruto es cerrado, de color gris crema suave, del epispermo café claro, y el diámetro del grano sin considerar el perigonio: 1.0 a 1.1 mm (Apaza, 2010).



Figura 2. Planta de cañihua de la variedad Cupi
Fuente: Apaza (2010).

2.1.3.2 Variedad Ramis

Esta variedad alcanza una altura de 52 cm, donde el diámetro del tallo central es de 4.5 mm, de color del tallo y hojas púrpura en madurez fisiológica. El aspecto del perigonio del fruto es semiabierto, de color gris oscuro, del epispermo café oscuro, y el diámetro del grano sin considerar el perigonio: 1.1 a 1.2 mm (Apaza, 2010). La planta de cañihua de la variedad Ramis se muestra en la figura 3.



Figura 3. Planta de cañihua de la variedad Ramis
Fuente: Apaza (2010).

2.1.3.3 Variedad Illpa INIA

Esta variedad alcanza una altura de 67 cm, donde el diámetro del tallo central es de 5.0 mm, de color del tallo y las hojas son anaranjado en madurez fisiológica (Figura 4). El aspecto del perigonio del fruto es cerrado, de color crema suave, del epispermo café claro, y el diámetro del grano sin considerar el perigonio: 1.0 a 1.1 mm (Apaza, 2010). La planta de cañihua de la variedad Illpa INIA se muestra en la figura 4.



Figura 4. Planta de cañihua de la variedad Illpa INIA
Fuente: Estación Experimental Agraria Illpa-Puno, Anexo-Salcedo

2.2 ALMIDÓN

El almidón es el polisacárido alimentario más importante, abundante y digerible y, por lo tanto, es una fuente importante de energía en nuestras dietas, se utiliza para mejorar las características funcionales deseadas y se agregan en cantidades relativamente pequeñas a los alimentos como aditivos alimenticios; por ejemplo, el almidón se usa como espesante y gelificante, su análisis es de interés con respecto a aspectos regulatorios y una necesidad tecnológica porque puede modificar la reología de los productos en los que se incorporan (Peris-Tortajada, 2004). Es un ingrediente industrial importante con muchos usos alimenticios y no alimenticios. La estructura y las propiedades fisicoquímicas del almidón son críticas para diversas aplicaciones (Sjöö & Nilsson, 2018).

2.2.1 Características fisicoquímicas del almidón

El almidón se organiza en partículas discretas, gránulos cuyo tamaño, forma, morfología, composición y estructura supramolecular depende de la fuente botánica. Los



gránulos de almidón tienen un aspecto característico, de modo que se puede identificar su origen con la ayuda del microscopio (Singh & Kaur, 2009; Eliasson, 2006).

La estabilidad, la transformación y las propiedades físicas de los materiales que contienen almidón dependen en gran medida de factores externos e internos. Los factores internos están determinados por las fuentes botánicas, incluidas las propiedades y la naturaleza de la estructura amorfa y cristalina de los gránulos de almidón nativo. Los tipos de almidón de diferentes fuentes botánicas varían en tamaños, morfología (elipsoidal, ovalada, esférica, poligonal, alargada, irregular, lenticular y disco), distribución del tamaño (uni-, bi- o polimodal) y ocurrencia en los amiloplastos (individualmente o como compuestos) (Pérez & Bertoft, 2010; Jane et al., 1994). Además, factores externos como el área de cultivo y el clima también influyen en las propiedades del almidón (BeMiller, 2011).

El tamaño de grano y forma son relacionadas con el origen botánico del almidón que es extraído. De acuerdo a Lindeboom et al. (2004), indica que, en general, el tamaño de grano puede variar más de $1\mu\text{m}$ o menos que $100\mu\text{m}$, además, definió las siguientes clases de acuerdo al tamaño: largo ($>25\mu\text{m}$), medio ($10-25\mu\text{m}$), pequeño ($5-10\mu\text{m}$) y muy pequeños ($<5\mu\text{m}$).

El almidón está conformado por amilosa, amilopectina, y una fracción minoritaria (de 1% a 2%) de conformación no glucosídica. La mayoría de los almidones en su estructura glucosídica está conformada por 20% de amilosa, y el restante 80% de amilopectina. Este posee la característica de ser la reserva de carbohidratos de las plantas, es insoluble en agua fría y generalmente está depositado como diminutos gránulos de tamaño entre 1 a 100 micrómetros y con la posibilidad de tener mayores diámetros (Peñaranda et al., 2008).

2.2.1.1 Contenido de amilosa y amilopectina

La estructura de las dos fracciones que contiene el almidón (amilosa y amilopectina) y la proporción variable en que se encuentran explican muchas de sus propiedades físicas y químicas. La amilosa es un polímero lineal que contiene un 99% de enlaces α -1,4 y un 1% de α -1,6, mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado que contiene 95% de enlaces α -1,4 y 5% de α -1,6. En la Tabla 1, se resumen las más importantes propiedades fisicoquímicas de la amilosa y amilopectina. Estos dos polímeros forman las regiones amorfas y cristalinas en el gránulo de almidón (Zhang et al., 2014).

Tabla 1.
Propiedades fisicoquímicas de amilosa y amilopectina

Propiedad	amilosa	amilopectina
Estructura molecular/ramificaciones	Principalmente lineal/ principalmente α - 1-4	Altamente ramificada/ α - 1-4; α - 1-6
Peso molecular	105-106 Da	107-109 Da
Yodo unión/color	20% / azul-negro	<1% / rojo – púrpura
Digestibilidad por β - amilasa	100%	Aprox. 60%
Dilatación en soluciones acuosas	Inestable	estable
Solubilidad	Baja/apenas soluble	Alta
Temperatura de gelatinización	Baja	Alta
Temperatura de fusión	Baja	Alta
Complejo amilosa - lípido	Cantidad muy alta	No
Formación de gel	Firme, irreversible	Suave, reversible
Films	Coherente	No forma fácilmente
Viscosidad	Baja	Alta
Espesante	Pobre	Bueno
Estabilidad al cizallamiento	Relativamente estable	Inestable
Fuerzas adhesivas	Débil	Fuerte
Estabilidad de congelación		
descongelación	Inestable	Estable
Tasa de retrogradación	Alta	Baja

Fuente: Schirmer et al. (2015)

La amilopectina es la responsable de la estructura del gránulo de almidón, el cual consiste de áreas cristalinas (cristales, micelas) y no cristalinas (amorfas, fase gel), arregladas en capas concéntricas. Las capas cristalinas están conformadas por dobles hélices de las ramificaciones de la amilopectina, mientras que los puntos de ramificación están en las zonas amorfas. El almidón presenta un grado de cristalinidad entre 20-40% (Jacobs & Delcour, 1998). En la figura 5, se muestra la representación esquemática de la estructura granular del almidón.

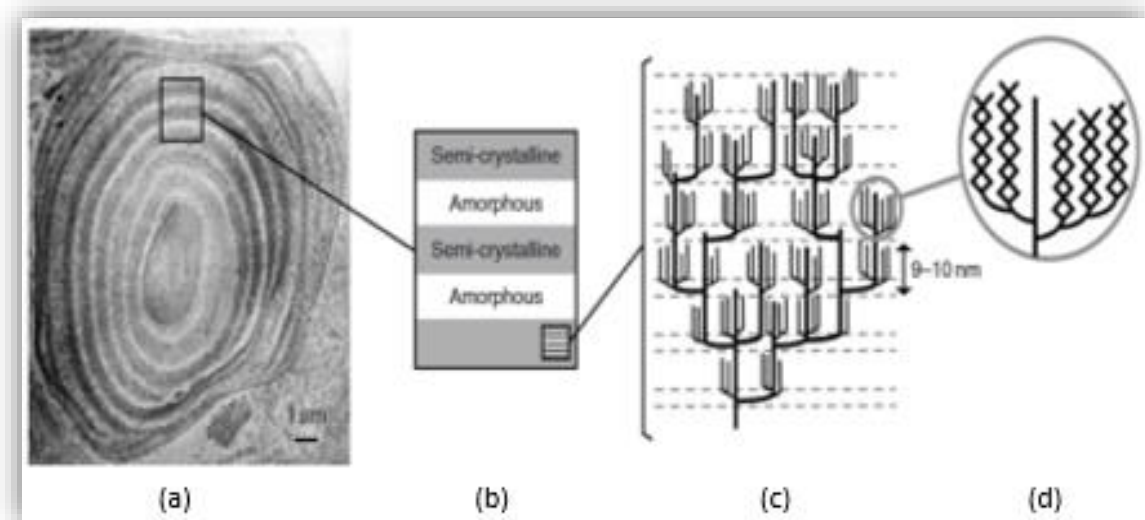


Figura 5. Representación esquemática de la estructura granular de almidón desde los anillos de crecimiento hasta la amilopectina: (a) Sección ultrafina de un gránulo de almidón de maíz ceroso; (b) alternancia de anillos semicristalinos y amorfos; (c) modelo agrupado de amilopectina. Las líneas punteadas delimitan las láminas amorfas y cristalinas (repetición de 9-10 nm) que corresponden a los puntos de ramificación y la disposición lateral de los grupos de cadenas cortas cristalinas, respectivamente. (d) detalle de un grupo que muestra la formación de dobles hélices a partir de las ramas cortas de amilopectina. **Fuente:** Buléon et al. (2007).

En general, la relación de amilosa y amilopectina dependen fuertemente de su origen botánico. Los almidones regulares contienen aproximadamente 70-80% de amilopectina y 20-30% de amilosa, almidones céreos menos del 10% de amilosa y almidones de alta amilosa más de 40% de ésta (Schirmer et al., 2013).



2.2.2 Propiedades funcionales del almidón

Con el fin de lograr sus atributos funcionales en productos que contienen almidón, éste tiene que pasar por un proceso térmico en casi todos los alimentos y otras aplicaciones industriales. Los geles de almidón formados tras el calentamiento en exceso de agua, refrigeración y almacenamiento implican varias transiciones de fase (Ahmed et al., 2012).

El calentamiento de una mezcla de almidón y agua experimenta primero la transición de cristalización reversible. Si la temperatura se incrementa aún más, se puede detectar el proceso de gelatinización irreversible. Durante el enfriamiento, la estructura amorfa en amilosa comienza a recrystalizarse seguido de la recrystalización de regiones amorfas en amilopectina (Schirmer et al., 2015).

2.2.2.1 Poder de hinchamiento, índice de solubilidad en agua, capacidad de absorción de agua

Según García et al. (2012), indican que, entre las propiedades funcionales más importantes del almidón se encuentran:

- ✓ Solubilidad, capacidad de absorción de agua y poder de hinchamiento.
- ✓ Grado de gelatinización.

A temperatura ambiente, los gránulos de almidón pueden absorber hasta un 30% de su peso en exceso de agua sin hinchazón notable. Sin embargo, durante el calentamiento, los gránulos de almidón absorben mucha más agua y se hinchan. El hinchamiento y la posterior solubilización de amilosa y amilopectina son los cambios estructurales más importantes durante y después de la gelatinización de los gránulos de almidón. Cuando el almidón se calienta en exceso de agua la estructura cristalina se altera debido a la rotura de enlaces de hidrógeno, y las moléculas de agua se vinculan por enlaces de hidrógeno a los grupos hidroxilo expuestas de amilosa y amilopectina. Esto provoca un aumento en el hinchamiento de los gránulos y la solubilidad (Hoover, 2001).



El PH es la cantidad de agua que un almidón puede absorber por gramo de almidón a una temperatura determinada y a una cierta concentración de almidón, mientras que la solubilidad representa los porcentajes de amilosa y amilopectina lixiviados a esta temperatura. La determinación de estos índices se mide aprovechando la CAA del gránulo de almidón y la exudación de fracciones de almidón a medida que se incrementa la temperatura de las suspensiones de almidón (Waterschoot et al., 2015; Ahmed et al., 2012).

2.2.3 Reología

Muller (1973) indica que, Reología es la ciencia de la deformación de la materia, se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos aparentemente continuos y coherentes, pero con frecuencia trata también de la fricción entre sólidos, del flujo de polvos, e incluso de la reducción a partículas o molturaciones. La Reología moderna, además de los comportamientos elástico y viscoso, estudia también sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir, sustancias viscoelásticas.

2.2.4 Reología en alimentos

Los alimentos pueden ser clasificados de diferentes maneras, por ejemplo, en forma de sólidos, geles, líquidos homogéneos, suspensiones de sólidos en líquidos y emulsiones. Los alimentos fluidos son aquellos que no conservan su forma, pero toman la forma del recipiente que los contiene. Los alimentos fluidos que contienen cantidades significativas de compuestos disueltos de alto peso molecular (polímeros) y/o sólidos en suspensión presentan un comportamiento no newtoniano. Muchos alimentos no newtonianos también presentan propiedades tanto viscosas y elásticas, es decir, que presentan un comportamiento viscoelástico (Rao, 1999).

La reología del almidón es el estudio de las relaciones de esfuerzo-deformación del almidón en los sistemas acuosos. La gelatinización del almidón, especialmente el hinchamiento del gránulo, cambia las propiedades reológicas del almidón. La posterior retrogradación modificará adicionalmente sus propiedades reológicas. Dependiendo de la fuente de almidón y la concentración, la estructura final de los productos con almidón dará una solución espesa o una estructura gelificada (Cui, 2005).

Para las mediciones reológicas, el reómetro dinámico permite la evaluación continua de los módulos dinámicos, el módulo de almacenamiento (G') (respuesta elástica) y el módulo de pérdida (G'') (respuesta viscosa), durante las pruebas de los barridos de temperatura y frecuencia de las suspensiones de almidón (Cui, 2005).

2.2.4.1 Clasificación reológica de los alimentos

Los alimentos, desde los sólidos, semisólidos hasta los líquidos, cambian su comportamiento reológico en cada etapa del proceso, se clasifican en la reología según propiedades físicas, tales como viscosidad, elasticidad o fluidez, los cuales pueden ser descritos con una amplia gama de modelos matemáticos. Dada la complejidad y la amplitud del tema, los investigadores han hecho una primera clasificación entre los alimentos newtonianos y no newtonianos según su comportamiento reológico, siga o no la ley de Newton de la viscosidad. Existen además alimentos en que el comportamiento reológico depende del tiempo de esfuerzo de corte que se ejerce sobre ellos. Finalmente, existen otros grupos de alimentos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos elásticos a la vez, los llamados fluidos visco elásticos (Holdsworth, 1971; Muller, 1973; Rao, 1977; Barbosa-Cánovas et al., 1993).

La clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológico se establece de la siguiente forma:

- Fluidos Newtonianos



- Fluidos No Newtonianos
 - Independientes del tiempo
 - Plásticos de Bingham
 - Pseudoplásticos
 - Dilatantes
 - Dependientes del tiempo
 - Fluidos tixotrópicos
 - Fluidos reopéticos
 - Viscoelásticos

Para la visualización gráfica del comportamiento reológico de los fluidos, es frecuente la utilización de reogramas, que son gráficos de esfuerzo cortante versus relación de deformación, que tienen una gran utilidad para identificar los diferentes tipos de comportamiento reológico, y que permiten mejorar el desarrollo de muchos productos alimenticios (Holdsworth, 1971; Muller, 1973; Rao, 1977; Barbosa-Cánovas et al., 1993).

2.2.4.1.1 Fluidos Newtonianos

Son líquidos cuyos coeficientes de viscosidad son constantes para una temperatura dada, es decir, cuando el fluido es sometido a esfuerzos de corte (σ) se desarrollan relaciones de deformación (γ) directamente proporcionales a la velocidad de deformación (Kyereme et al., 1999).

Así, el comportamiento reológico de los fluidos ideales o newtonianos puede describirse mediante la ley de Newton de la viscosidad, que viene expresada por la ecuación:

$$\mu = \sigma / \dot{\gamma}$$

donde μ es la constante de proporcionalidad entre esfuerzo de corte, σ , versus relación de deformación, $\dot{\gamma}$, denominado coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica.



Los fluidos newtonianos por definición poseen una línea recta entre el esfuerzo de corte y la relación de deformación con intercepto cero. Todos los fluidos que no presenten este comportamiento pueden ser llamados no newtoniano (Kyereme et al., 1999).

Entre los alimentos de comportamiento newtoniano se encuentra el agua y las disoluciones diluidas de azúcares, te, café, leche (Bourne, 1982; Perry & Chilton, 1982), algunos aceites ligeros de cocina y la leche cruda y homogeneizada (Steffe et al., 1986) las bebidas carbónicas, los extractos de carne; el jarabe de maíz (Rao, 1975); el huevo y algunos de sus derivados (Scaldo et al., 1970).

2.2.4.1.2 Fluidos no Newtonianos independientes del tiempo

En este caso no hay proporcionalidad entre la relación de deformación y el esfuerzo de corte; por lo que su viscosidad no permanece constante cuando la temperatura y la composición permanecen invariables, sino que depende del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad, recibiendo, por tanto, el nombre de viscosidad aparente (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 1999).

Los fluidos independientes del tiempo se han clasificado en tres categorías o grupos: pseudoplásticos, dilatantes, y plásticos, caracterizándose por que la viscosidad aparente; sólo depende de la temperatura, de la composición del fluido y del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad aplicado, pero nunca del tiempo de aplicación de éste último (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 1999).

En la Figura 6, se describen los fluidos reológicos más frecuentes, fluidos newtonianos, pseudoplásticos, dilatantes y plásticos, cuya viscosidad es estructural y tiene un límite de fluencia.

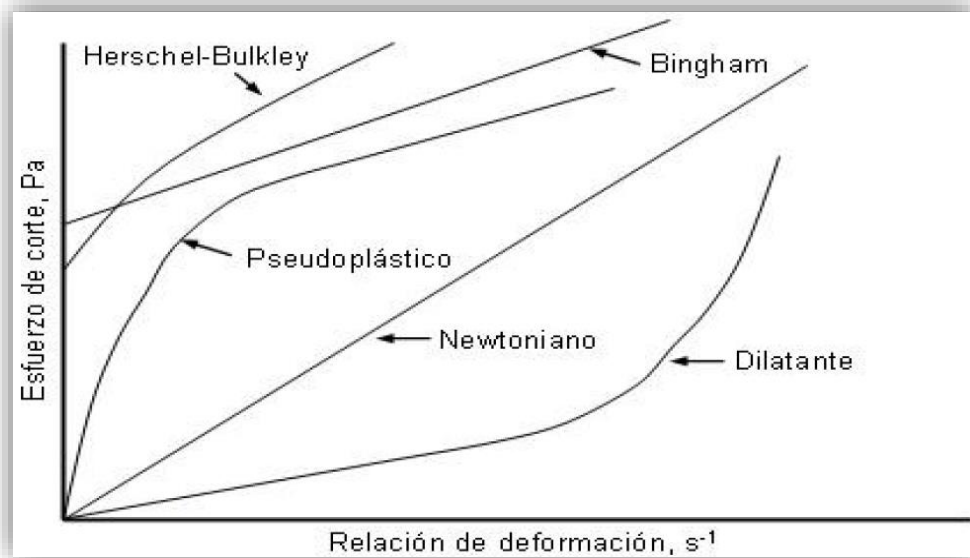


Figura 6. Reograma de fluidos independientes del tiempo
Fuente: Steffe (1996)

a) Fluidos Pseudoplásticos

Sharma (2000), indica que a estos fluidos se les conoce también como fluidos de adelgazamiento al corte. Este comportamiento es el más común dentro de los fluidos no newtonianos y se caracteriza porque su curva en el reograma es convexa con respecto al eje de esfuerzo cortante. En ellos la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de cizalla, es decir son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizallan lentamente. La razón de este comportamiento al flujo es que al incrementarse el gradiente de velocidad se deforma y/o se reordenan las partículas en suspensión del fluido, originándose una menor resistencia al flujo y obteniéndose como consecuencia una menor viscosidad.

Uno de los modelos más utilizado para describir este tipo de comportamiento es el de ley de potencia de Ostwald-deWaele:

$$\sigma = K \gamma^n$$



donde K es el coeficiente de consistencia de flujo y n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional). K da una idea de la consistencia del producto y n de la desviación del comportamiento al flujo respecto al newtoniano.

Otra relación muy utilizada es la propuesta por Herschel-Bulkley, este modelo es una relación general para describir el comportamiento de fluidos no-newtonianos, cuya expresión supone ampliar la ley de la potencia con un término correspondiente al umbral de fluencia (σ_0) (Sherman, 1970).

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n + \sigma_0$$

Existen otros modelos, pero los más utilizados en el caso de fluidos alimentarios pseudoplásticos son los anteriormente descritos.

b) Fluidos Dilatantes

En este caso la viscosidad aumenta con la tasa de corte, lo inverso al comportamiento pseudoplástico. La dilatancia se explica que a velocidades de deformación bajas las partículas sólidas de tamaños y formas variadas, están unidas y estrechamente empaquetadas y la fracción líquida llena los espacios y lubrica el movimiento, por lo que la viscosidad aparente es baja. Con el aumento de la velocidad de deformación, las partículas largas y flexibles pueden estirarse, rompiéndose el empaquetamiento de los sólidos y la fracción de espacios entre las partículas aumenta. No habiendo suficiente líquido para lubricar el roce de unas partículas contra otras, la viscosidad aparente aumenta. Entonces la dilatancia es evidencia de una formación o reorganización de la estructura de la muestra, dando como resultado un aumento en la resistencia al aplicar una fuerza (Rha, 1978).

Los modelos reológicos que se utilizan para describir este comportamiento son los mismos que los aplicados para describir el comportamiento pseudoplástico, que se ha expuesto en el apartado anterior.



c) Fluidos Plásticos

Los fluidos plásticos son aquellos que no fluyen hasta que son sometidos a un esfuerzo cortante límite determinado, llamado esfuerzo de deformación plástica, umbral de fluencia o límite de fluencia, σ_0 (Cheftel et al., 1983). En el caso de los fluidos plásticos de Bingham, una vez que se supera el valor del umbral de fluencia, la velocidad de deformación es proporcional al esfuerzo de corte, como en el caso de los fluidos newtonianos. Estos fluidos exhiben propiedades de líquido a esfuerzos superiores al umbral de fluencia, por lo tanto, pueden ser clasificados tanto como líquidos o como sólidos (Wazer et al., 1963).

2.2.4.1.3 Fluidos no Newtonianos dependientes del tiempo

La viscosidad aparente varía no sólo con el esfuerzo de corte, sino que también para un esfuerzo de corte constante, varía con el tiempo de duración de la relación de deformación; clasificándose en fluidos tixotrópicos y reopéticos. Para los primeros, a una velocidad de deformación fija, la viscosidad disminuye con el tiempo de cizallado; para los últimos, la viscosidad aumenta con el tiempo (Rao, 1977; Barbosa-Cánovas, et al., 1993).

a) Fluidos Tixotrópicos

Su viscosidad aparente y el esfuerzo de corte disminuyen con el tiempo al mantener una velocidad de deformación constante, debido al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible. La tixotropía indica una continua ruptura o reorganización de la estructura, dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo (Rha, 1978).

Este fenómeno puede explicarse por la presencia entre las cadenas lineales de coloides hidrófilos, de enlaces hidrógeno que se rompen por la agitación y se reagrupan en el reposo (Muller, 1973; Steffe, 1996; Cheftel et al., 1983). Ejemplos típicos son los

alimentos para niños basados en carne, vegetales, pescado, y postre de frutas (Alonso et al., 1995).

b) Fluidos Reopéticos

En estos fluidos la viscosidad aumenta con el tiempo, cuando el esfuerzo de corte permanece constante (Steffe,1996). Este comportamiento implica la elaboración o reorganización de estructura, que trae consigo un aumento de la resistencia al flujo (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 1999).

En la Figura 7, se describen los fluidos reológicos dependientes del tiempo, fluido Tixotrópico y fluido Reopético.

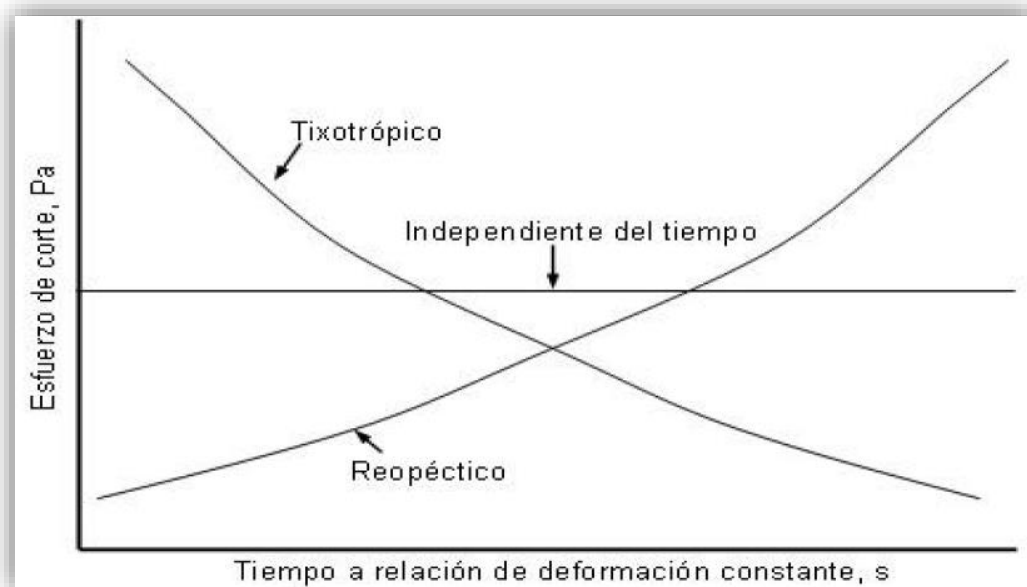


Figura 7. Reograma de fluidos dependientes del tiempo
Fuente: Steffe (1996)

2.2.4.1.4 Fluidos no Newtonianos viscoelásticos

Las características de los productos viscoelásticos varían desde las de los líquidos viscosos con propiedades elásticas, a las de los sólidos con propiedades viscosas. En condiciones normales, no es apreciable la elasticidad debida al estiramiento de los enlaces interatómicos y se puede afirmar que la elasticidad de los alimentos viscoelásticos es debida a la deformación elástica de las macromoléculas. En los alimentos viscoelásticos



es frecuente que sólo se dé una recuperación parcial, porque la red tridimensional elástica se desintegra bajo el efecto de la tensión. Cuanto más completa y resistente sea esta red, tanto más acusada será la elasticidad; cuanto más fácilmente se desintegre la red, mayor será el componente viscoso (Muller, 1973).

Existen varios alimentos que presentan propiedades viscoelásticas. Se trata, en general, de productos con características de geles o semisólidos como los geles de almidón-gelatina y los de leche, los helados, las manzanas, los fideos cocidos, el queso, la masa de harina de trigo, las espumas de proteína y los granos de maíz y trigo (Muller, 1973). También presentan propiedades viscoelásticas la crema de leche y la mantequilla batida (Rao & Rizvi, 1986).

2.2.5 Constantes reológicas fundamentales

Mientras que un líquido newtoniano, para una temperatura y presión dadas, presenta sólo un parámetro de viscosidad, las descripciones más simples de un líquido no-newtoniano consideran, como mínimo, dos parámetros: índice de consistencia (K) e índice de comportamiento reológico (n). Algunos fluidos también presentan un esfuerzo cortante límite o umbral de fluencia (σ) (Barnes, 2001).

El coeficiente de consistencia K , es una constante de proporcionalidad entre la relación de deformación y el esfuerzo de corte aplicado que la produce. Es, por lo tanto, un indicador del grado de viscosidad en fluidos no newtonianos.

El índice de comportamiento reológico n , es un número adimensional que indica la cercanía al flujo newtoniano. Para un líquido newtoniano n es 1; para un fluido dilatante n es mayor que 1; y para un fluido pseudoplástico n es menor que 1.

El esfuerzo cortante límite puede ser definido como el mínimo esfuerzo de corte requerido para iniciar el flujo (Bourne, 1982; Steffe, 1996).

2.2.6 Análisis reológico

Según Mandala (2012) sostiene que, el almidón es una estructura viscoelástica complicada. Los geles de amilosa y amilopectina presentan generalmente módulos de almacenamiento más altos que otros hidrocoloides. Además, durante la gelatinización se pueden observar cambios viscoelásticos en función a la temperatura, similares a los cambios en la viscosidad debido a los fenómenos de hinchamiento, gelatinización y rompimiento de la estructura. Estos cambios dependen del tipo de almidón y de su concentración. El método más usado para caracterizar la viscoelasticidad es el experimento reológico oscilatorio, donde se pueden medir las contribuciones al comportamiento elástico y viscoso de los materiales.

2.2.6.1 Barrido de deformación

Un barrido de deformación permite obtener información sobre la magnitud del comportamiento elástico y/o viscoso de un fluido a una frecuencia y temperaturas constantes. Para esto se emplea la relación de los módulos G' y G'' . El módulo G' o módulo de almacenamiento se define como la medida de la energía de deformación almacenada por la muestra durante un proceso de cizalla. Este módulo representa el comportamiento elástico del material analizado. El módulo G'' o módulo de pérdida se define como la medida de la energía de deformación utilizada por la muestra durante el proceso de corte. Este módulo representa el comportamiento viscoso de un material de prueba (Mezger, 2006). Cuando $G' > G''$ la estructura del material es definida como un sólido viscoelástico y su comportamiento es principalmente elástico. Cuando $G'' > G'$ la estructura es definida como un fluido viscoelástico y su comportamiento es principalmente viscoso. Entre más grande es la diferencia entre los módulos el fluido muestra propiedades de un sólido o un fluido puro respectivamente (Huang et al., 2011; Welti-Chanes & Aguilera, 2002). Cuando G' y G'' y la diferencia entre ellos aumenta,



los fluidos son de mayor carácter viscoelástico, es decir, presentan un aumento en la capacidad de almacenar energía a bajas deformaciones y liberarla al finalizar la deformación y regresar a su configuración original sin variaciones. Del análisis de barrido de deformación se obtiene la constante de factor de pérdida ($\text{Tan } \delta$) que corresponde a la relación entre G'' y G' . Este valor es un índice de cómo reacciona el fluido a la deformación aplicada durante el experimento, y describe así el grado de viscoelasticidad del mismo (Norton et al., 2010).

$$\text{Tan } \delta = G'' / G'$$

Un valor de $\text{Tan } \delta = 0$ corresponde a una deformación idealmente elástica; cuando el valor de $\text{Tan } \delta = \infty$ el sistema es idealmente viscoso. En otras palabras, entre más alto el valor de $\text{Tan } \delta$ más alta es la contribución viscosa del sistema y más baja la elástica. Al intervalo de deformación aplicada en donde la magnitud de $\text{Tan } \delta$ se mantiene constante se le denomina rango de linealidad viscoelástica o LVE por sus siglas en inglés lineal viscoelasticity (Ospina, 2016).

La determinación del rango de linealidad viscoelástica es necesaria para determinar el porcentaje de deformación, perteneciente a este rango, en el que se deben realizar los ensayos de barrido de frecuencia. Con este porcentaje seleccionado se garantiza que el barrido de frecuencia se realice exclusivamente en el rango LVE. Al garantizar estar en el rango LVE los cambios de estructura del material solamente dependerán de los tiempos experimentales aplicados durante los barridos de frecuencia (Ospina, 2016).

2.2.6.2 Barrido de frecuencia

Una vez establecida la región viscoelástica lineal, las pruebas reológicas dinámicas se pueden realizar para obtener propiedades útiles de alimentos viscoelásticos. Se puede detectar el límite de linealidad cuando las propiedades reológicas dinámicas



(por ejemplo, G' y G'') cambian rápidamente de sus valores casi constantes. Otro punto a comprobar es que el rango de viscoelasticidad lineal no se ha superado, porque fuera de esta gama de los resultados también dependerá de la amplitud de la deformación. Como el intervalo viscoelástico lineal puede disminuir durante la gelificación, no siempre es fácil determinar que se cumpla esta condición esencial (Eliasson, 2006).

Los estudios de barrido de frecuencia se caracterizan en el que G' y G'' se determinan como una función de la frecuencia (ω) a una temperatura fija. Cuando se realizan correctamente, las pruebas de barrido de frecuencia proporcionan datos a través de una amplia gama de frecuencias. Sin embargo, se requieren de sus parámetros fundamentales, cada prueba debe limitarse al comportamiento lineal viscoelástico. Con frecuencia, uno ve el aumento de G' y G'' con una frecuencia creciente. Basándose en los datos obtenidos del barrido de frecuencias, se puede designar "geles fuertes" cuando los reordenamientos moleculares dentro de la red son muy reducidos sobre las escalas de tiempo analizados, tal que G' es mayor que G'' en toda la gama de frecuencias, y es casi independiente de la frecuencia. En contraste, en los "geles débiles", hay una mayor dependencia de la frecuencia con los módulos dinámicos, lo que sugiere la existencia de procesos de relajación que se producen incluso en escalas de tiempo cortas, y una menor diferencia entre los valores de los módulos (Rao, 2014).

Para un alimento específico, magnitudes de G' y G'' están influenciados por la frecuencia, temperatura y la deformación. Para los valores de deformación dentro del intervalo lineal, G' y G'' son independientes de la deformación. Se ha encontrado que estas funciones viscoelásticas desempeñan papeles importantes en la reología de la estructura de los polisacáridos. Cabe señalar que, si G' es mucho mayor que G'' , el material se comportará más como un sólido, es decir, las deformaciones serán esencialmente elásticas o recuperables. Sin embargo, si G'' es mucho mayor que G' la energía utilizada para

deformar el material viscoso se disipa y el comportamiento del material es similar a un líquido (Rao, 2014; Steffe, 1996).

Con este análisis se pueden realizar comparaciones de “huellas digitales” de diferentes productos alimenticios o comparar efectos de diferentes ingredientes y procesos productivos sobre la viscoelasticidad y relacionarlas con la vida útil (Steffe, 1996).

2.2.6.3 Barrido de temperatura

En los estudios de barrido de temperatura los módulos G' y G'' se determinan como una función de la temperatura a una fija frecuencia ω . Esta prueba es muy adecuada para el estudio de la formación del gel durante el enfriamiento de una dispersión calentada y la gelatinización de una dispersión de almidón durante el calentamiento. En la gelatinización del almidón se realiza con una geometría de placas paralelas y se presta una considerable atención en minimizar la pérdida de humedad de las dispersiones. La existencia de la región lineal viscoelástica se puede verificar en experimentos preliminares, llevados a cabo sobre un producto determinado en varias etapas de temperatura (Rao, 2014).

Mandala (2012) menciona que las medidas reológicas son muy importantes y pueden ser usadas en los siguientes casos: (a) caracterización de la calidad del producto, (b) diseño del proceso y análisis de las condiciones de flujo (selección de la bomba, filtración, extrusión, etc.), (c) diseño de nuevos alimentos e (d) investigación básica en interacciones de ingredientes.

2.2.6.4 Comportamiento de flujo o curva de fluidez

El análisis del cambio de la viscosidad con la cizalla de estudio es conocido como curva de flujo. La mayoría de fluidos de interés industrial presentan desviaciones de la ley de Newton debido a que su viscosidad cambia en función de la velocidad de cizalla



aplicada. Por lo tanto, los estudios de curva de fluidez proporcionan datos para conocer el tipo de comportamiento de las sustancias (Kreith, 1999).

Existen varios tipos de comportamiento no newtoniano el tipo de comportamiento se fundamenta en el tipo de desviación que presenta con respecto a la ley de Newton. Para describir estos tipos de comportamiento no newtoniano se utilizan reogramas. Los reogramas son representaciones graficas las cuales describen el tipo de flujo de una sustancia bajo determinadas condiciones (velocidad de cizalla y fuerza de cizalla) (Ospina, 2016).

2.3 ALMIDÓN DE CAÑIHUA

Actualmente el cultivo de la cañihua aún carece de estudios agroindustriales, sobre todo del potencial agroindustrial del almidón que se puede obtener de este grano.

Se informó que el contenido de amilosa en el almidón de cañihua se encuentra entre 11% y 20% (Pérez-Rea & Antezana-Gómez, 2018).

Por otro lado, también se reportó que, los gránulos de almidón de cañihua tienen forma poliédrica similar a los almidones de la quinua, amaranto y arroz (Kong et al., 2009), típica de cereales.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución

El presente proyecto de investigación se llevó a cabo en la unidad descentralizada del Megalaboratorio, Laboratorio de propiedades físicas y análisis reológicas, ubicado en el laboratorio de biotecnología de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú y el Laboratorio de Análisis del Instituto Nacional de Investigación Agraria- INIA - Estación Experimental Rinconada Salcedo – Puno.

3.2 Material biológico

La semilla de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) de tres variedades: CUPI, ILLPA INIA y RAMIS, se adquirieron del Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) - Estación Experimental Rinconada Salcedo – Puno.

3.3 Materiales

- Vasos de precipitados Pirex de 5ml, 50ml, y 500ml Marca Boeco
- Probeta graduada de 100ml Marca Boeco Germany.
- Pipetas graduadas Pirex.
- Placas Petri Marca Esteriplan.
- Tubos de ensayo Pirex.
- Bolsas Ziploc de polietileno.
- Termómetro de Mercurio.
- Mortero.
- Tela filtrante.
- Portaobjetos.



3.4 Equipos

- Reómetro Modular Compacto (MCR) Marca Anton Paar (MCR 302, Anton Paar GmbH, Graz, Austria) equipado con un plato paralelo de 50 mm de diámetro (PP50).
- Tamices Ro – TAP Marca Retsch.
- Agitador magnético Vortex Marca Ingenieurbüro CAT, M. Zipperer GmbH.
- Balanza electrónica analítica ALC - 210 Marca ACCULAB - Sartorius group.
- Baño de agua maria Marca Memmert.
- Espectrofotómetro Marca Genesys 150.
- Centrífuga Marca Hettich.
- Estufa de secado Marca ED BinderTM.
- Licuadora Marca Oster.
- Microscopio estereoscópico equipado con cámara digital Marca Leica.
- Agitador magnético con calefacción C-MAG HS 7 Marca IKA.
- Molino pulverizador de granos.

3.5 Reactivos

- Hidróxido de sodio A.C.S. Marca R - JT Baker 3722.
- Agua destilada.
- Etanol 95%.
- Ácido acético.
- Yodo.

3.6 Software

- Programa estadístico Statgraphics centurión XVI
- Software del Reómetro Modular Compacto (MCR) “Anton Paar RheoCompass”.



3.7 Métodos de análisis

3.7.1 Caracterización fisicoquímica

3.7.1.1 Distribución de Tamaño de Partícula (DTP)

Se realizó de acuerdo a los procedimientos descritos por Sahai et. al (2001) con algunas modificaciones.

Se pesaron 100 g de muestra y se agitaron mediante el uso de un equipo Ro – TAP con los siguientes números de malla: 80, 100, 140 y 200; durante 15 minutos, al término del tiempo se pesaron las fracciones retenidas en las diferentes mallas. La distribución obtenida se reportó como el porcentaje de retención en cada malla en base a la muestra inicial de almidón, como se muestra a continuación:

$$DTP (\%) = \left(\frac{\text{g retenidos en cada malla}}{\text{g muestra inicial}} \right) \times 100 \%$$

3.7.1.2 Determinación de amilosa y amilopectina

La determinación del contenido de amilosa – amilopectina de las muestras de almidón se expresaron en porcentaje, según el método descrito por la Técnica ISO 6647 (1987).

3.7.2 Propiedades funcionales

3.7.2.1 Poder de hinchamiento (PH), Índice de solubilidad en agua (IS) y Capacidad de absorción de agua (CAA)

El PH, IS y CAA fueron determinados de acuerdo al método descrito por Gani et al. (2014) con algunas modificaciones.

Se pesó 0.6 g de muestra de almidón (M0) y se mezcló con 30 ml de agua destilada. La suspensión se agitó y se colocó en un baño de agua durante 30 min a 45, 55, 65 y 75 °C. Seguidamente, se enfrió la muestra a temperatura ambiente y se centrifugó a 1500 x g durante 30 min. El sobrenadante se retiró cuidadosamente y el sedimento de



almidón hinchado se pesó (M1). El sobrenadante se colocó en placas Petri, luego se llevó a la estufa a 45°C durante 48 h hasta obtener un peso constante (M2). Finalmente se calcularon a partir de las ecuaciones dadas a continuación:

$$\text{Poder de hinchamiento (PH)} = M1 \text{ (g)} / (M0 - M2) \text{ (g)}$$

$$\text{Índice de solubilidad (IS) (\%)} = (M2 \text{ (g)} / M0 \text{ (g)}) \times 100$$

$$\text{Capacidad de absorción de agua (CAA)} = M1 \text{ (g)} / M0 \text{ (g)}$$

3.7.3 Comportamiento reológico

Las mediciones de comportamiento reológico se realizaron a diferentes suspensiones almidón: agua, siendo estas: 1:9; 2:8 y 3:7, usando un Reómetro Modular Compacto (MCR 302, Anton Paar GmbH, Graz, Austria) equipado con un sistema de plato paralelo de 50 mm de diámetro (PP50), el tamaño de gap fue de 1000 μm .

3.7.3.1 Barrido de temperatura

Se realizó de acuerdo a Kong et al. (2010), con algunas modificaciones.

Se agitaron las suspensiones de almidón: agua, con un agitador vortex a temperatura ambiente durante 5 min, luego se cargó la suspensión en el plato inferior del reómetro. La suspensión se calentó en un rango de temperatura de 20°C a 75°C, a una velocidad de rampa de 2°C/min. La tensión de corte fue de 2% dentro de la Región Viscoelástica Lineal (RVL), y la frecuencia fue de 1Hz. Los parámetros reológicos, módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') se registraron en función de la temperatura.

3.7.3.2 Barrido de frecuencia

Se realizó de acuerdo a Kong et al. (2010), con algunas modificaciones.

Se agitaron las suspensiones de almidón: agua, con un agitador vortex. Se calentó el almidón hasta 60°C en baño maría hasta la formación de un gel. El gel resultante se cargó en el reómetro y se mantuvo durante 5 min a 25°C para lograr un estado de

equilibrio. El barrido de frecuencia se realizó a una temperatura de 25 °C de 0.1 a 40 Hz (0.628 – 249.944 rad/s), mientras que la tensión de corte fue de 2% dentro de la Región Viscoelástica Lineal (RVL).

3.7.3.3 Curva de fluidez y Viscosidad

Se realizó de acuerdo a Kong et al. (2010), con algunas modificaciones.

Se agitaron las suspensiones de almidón: agua durante 2 min usando un agitador vortex, seguidamente se calentó hasta 60°C durante 15 min. El gel resultante se transfirió a la placa del reómetro y se equilibró durante 5 min a 25°C, se cizalló de 1000 a 0.1 s⁻¹. La curva de flujo resultante fue ajustada al modelo de Herschel-Bulkey, mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = K \gamma^n + \sigma_0$$

Donde σ : esfuerzo de corte (Pa), K: coeficiente de consistencia (Pa.sⁿ), γ : velocidad de deformación (s⁻¹), n: índice de comportamiento de flujo (adimensional) y σ_0 : Esfuerzo de fluencia (Pa).

3.8 Metodología experimental

3.8.1 Extracción del almidón de cañihua

Se usó la metodología de extracción de almidón de acuerdo con el método descrito por Choi et. al (2004) con algunas modificaciones. El flujo de operaciones se presenta en la Figura 8, para cada variedad de cañihua el proceso se realiza por separado, hasta llegar a la obtención de almidón.

Grano de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) de variedades:
Cupi, Illpa INIA y Ramis)

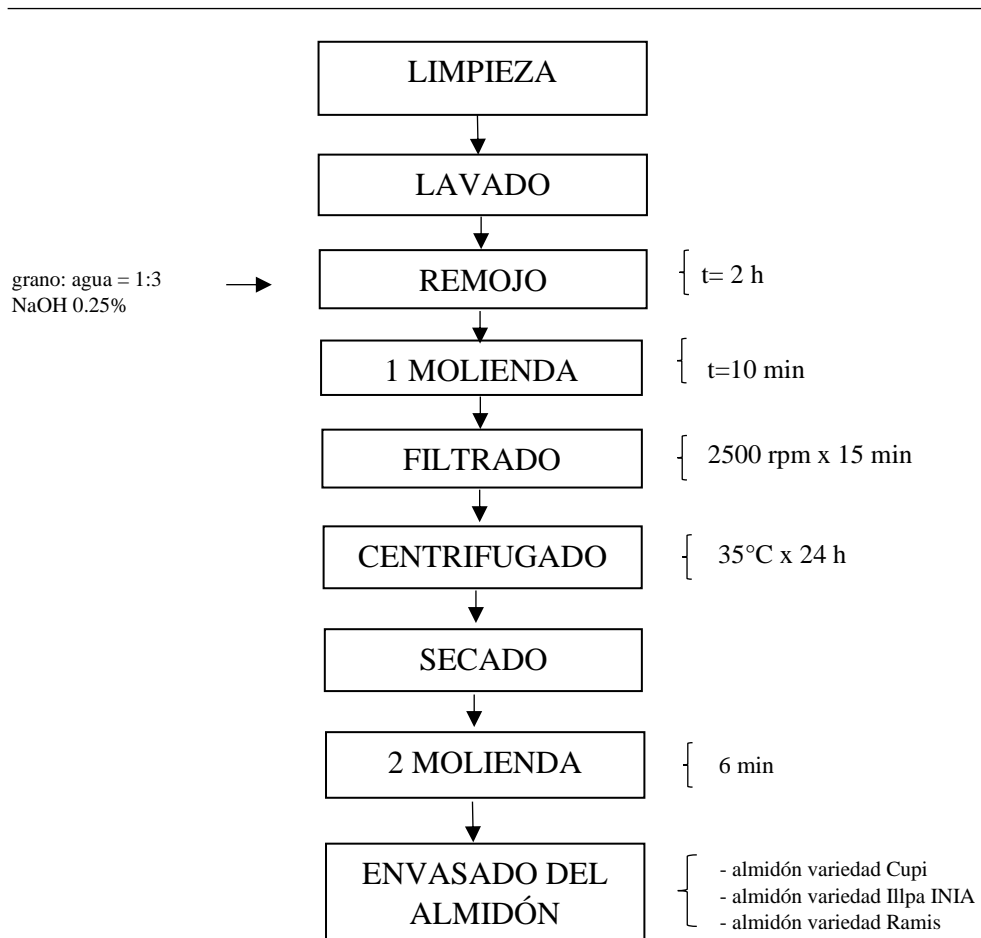


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón de cañihua

- Limpeza: Se realizó la limpieza del grano con la finalidad de remover el perigonio del grano, pajas y tierra de manera manual.
- Lavado: Se realizó el lavado de los granos con la adición de agua potable en cantidad suficiente para que el grano quede sumergido completamente, se dejó escurrir el agua y luego se enjuagó repetidas veces hasta la eliminación total del perigonio.
- Remojo: Los granos se remojaron en NaOH 0.25% (p/v) (0,25 g / 100 ml) durante 2h y se agitaron 3 veces durante este periodo, la relación de grano: agua durante



el remojo fue de 1:3.

- d) 1 Molienda: La muestra se trituró en una licuadora a toda velocidad durante 10 minutos.
- e) Filtrado: La suspensión se filtró a través de tela de muselina.
- f) Centrifugado: El filtrado se centrifugó a 2500 rpm durante 15 min. Se desechó el sobrenadante y se raspó la capa superior de color amarillo – pardo – gris. El almidón restante se resuspende en agua pura y se centrifuga como se describe anteriormente, hasta que el sobrenadante sea transparente y la capa de almidón sea blanca.
- g) Secado: El almidón blanco se secó en un horno a 35°C durante 24 h.
- h) 2 Molienda: El almidón seco se molió en un molino pulverizador durante 6 minutos.
- i) Envasado del almidón: El almidón de las tres variedades de cañihua se envasó en bolsas herméticas.

3.9 Modelo estadístico

Los datos experimentales del comportamiento Reológico, específicamente del Comportamiento de flujo o Curva de Fluidez se ajustó mediante el modelo reológico matemático de Hershel – Bulkey ($\sigma = K \gamma^n + \sigma_0$). La calidad del ajuste del modelo se evaluó por medio del coeficiente de determinación R^2 .

Se trabajó con el programa estadístico Statgraphics centurión XVI versión 16.1.11; el grado de variación y diferencia significativa se realizó mediante un análisis de varianza (ANVA). El valor $p < 0.05$ en la tabla ANVA determinará diferencias significativas entre cada tratamiento para el comportamiento reológico, características fisicoquímicas y propiedades funcionales del almidón de tres variedades de cañihua. Además, se realizó una prueba de comparación de medias (LSD de Fisher) para



determinar las medias significativamente diferentes para un valor p menor que 0.05. Los tratamientos se ajustaron al siguiente modelo matemático:

$$\text{Modelo estadístico lineal: } Y_{ijk} = \mu + T_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Es una observación en la j-ésima unidad experimental, sujeto al i-ésimo tratamiento.

μ = Es el efecto medida general.

T_i = Es el efecto del i-ésimo tratamiento.

ϵ_{ij} = Efecto verdadero de j-ésimo unidad experimental (replica) sujeta al i-ésimo tratamiento (error experimental).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización fisicoquímica de los almidones de cañihua

4.1.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

La DTP del almidón de tres variedades de cañihua analizados, se presentan en la Tabla 2.

Se observa que, para el almidón de las tres variedades de cañihua, el mayor porcentaje de almidón retenido se dio en la malla N° 200 el cual representa un tamaño de partícula de 75 μm , dentro del cual, el almidón de la variedad Cupi contiene 46.74% de partícula retenida, el cual difiere significativamente en comparación con las variedades de almidón Illpa INIA y Ramis las cuales no difieren entre ambas y representan porcentajes más altos, siendo estos, 56.26% y 55.20% respectivamente.

Tabla 2.

Distribución de tamaño de partícula de los almidones de cañihua

Variedad de almidón de cañihua	de	% almidón de cañihua retenido en cada malla				
		Malla N°80 (180 μm)	Malla N°100 (150 μm)	Malla N°140 (106 μm)	Malla N°200 (75 μm)	Base (<75 μm)
CUPI		10.58 ^a \pm 1.67	6.70 ^a \pm 0.74	17.12 ^a \pm 0.60	46.74 ^a \pm 1.44	18.86 ^b \pm 3.51
ILLPA INIA		10.90 ^a \pm 1.01	6.09 ^a \pm 0.4	18.73 ^b \pm 1.0	56.26 ^b \pm 1.55	8.02 ^a \pm 1.42
RAMIS		10.59 ^a \pm 0.82	8.02 ^b \pm 0.73	20.0 ^b \pm 0.18	55.20 ^b \pm 1.0	6.19 ^a \pm 1.32

Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher ($p < 0.05$)

El almidón de las tres variedades de cañihua medido a partir de la utilización de tamices, presentan en su mayoría un tamaño de 75 μm , acorde a esto, las fichas técnicas elaboradas para almidones comerciales indican que la mayoría de las partículas de almidón deben atravesar la malla N° 100, es decir, presentar tamaños menores a 150 μm , así mismo, la Norma Técnica Peruana (NTP) 209.077: 1974 (revisada el 2018), indica que, en la determinación del tamaño de partícula para almidones y féculas, estas deben atravesar la malla N°80.

Las partículas de almidón de las tres variedades de cañihua evaluados presentan diámetros menores, más homogéneas y sin formación de grumos, siendo un factor importante cuando se define el propósito específico del producto, de conformidad con esto, Aristizábal & Sánchez (2007), sostienen que, el tamaño de partícula influye en la textura y suavidad de los productos finales, por lo que se consideran aceptables tamaños de partículas menores a 150 μm . Acorde a esto, el tamaño resultante del almidón de las tres variedades de cañihua evaluados están dentro del rango considerado aceptable. Wani et al. (2012) indican que, la variación en la forma y tamaño de los gránulos se atribuye al origen biológico del cual se aísla el almidón. La morfología de los gránulos de almidón depende de la bioquímica del cloroplasto o amiloplasto, de la fisiología de la planta (Singh et al., 2003), así como de las condiciones climáticas y de las prácticas agronómicas (Wani et al., 2012).

Rasper (1971), indica que, el tamaño de partícula y la distribución del tamaño de partícula, se encuentran entre características determinantes que afectan más notablemente el comportamiento de gránulos de almidón en su procesabilidad.

4.1.2 Contenido de amilosa y amilopectina

En la Tabla 3, se presenta la relación del porcentaje del contenido de amilosa y amilopectina del almidón de las tres variedades de cañihua, mediante el cual se observa que no existe diferencia significativa para cada caso, en cada variedad.

Tabla 3.

Contenido de amilosa y amilopectina de los almidones de cañihua

Variedad de almidón de cañihua	% Amilosa	% Amilopectina
CUPI	14.2 ^a \pm 0.44	85.8 ^a \pm 0.44
ILLPA INIA	13.2 ^a \pm 0.48	86.8 ^a \pm 0.48
RAMIS	13.0 ^a \pm 1.02	87.0 ^a \pm 1.02

Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher ($p < 0.05$)

Los resultados indican que existe menor porcentaje de amilosa y mayor porcentaje de amilopectina en todas las variedades analizadas, siendo el rango de contenido de



amilosa de 13.0% - 14.2%. El contenido mas alto de amilosa lo presentó el almidón de la variedad Cupi.

Los datos obtenidos en la Tabla 3, se encuentran dentro del rango reportado por Steffolani et al. (2013) y Pérez-Rea (2014), quienes indican que, el contenido de amilosa en el almidón de cañihua se encuentra entre 11 – 20%, siendo estos, rangos mayores al contenido de amilosa presente en almidón de quinua, los cuales oscilan entre 5 – 12%, mientras que, el almidón de Amaranto cruentus presenta rangos de 4.7-12.5% (Kong et al. 2009), sin embargo, los contenidos de amilosa de ambos pseudocereales (quinua y cañihua) son mas bajos en comparación con la de los almidones de tubérculos (Steffolani et al. 2013).

De acuerdo con Schirmer et al. (2013) quienes sostienen que, en general, la relación de amilosa y amilopectina dependen fuertemente de su origen botánico, y que además, los almidones regulares contienen aproximadamente entre 70-80% de amilopectina y 20-30% de amilosa, mientras que los almidones céreos menos del 10% de amilosa y los almidones con un contenido alto de amilosa presentan más de 40% de ésta, se puede afirmar que los almidones de cañihua de las variedades Cupi, Illpa INIA y Ramis pertenecen a la clasificación de almidones regulares.

Por otro lado, la amilosa se caracteriza porque favorece la retrogradación de sus pastas durante el enfriamiento, ocasionando el indeseable fenómeno de sinéresis, mientras que la amilopectina presenta pastas espesas que no se retrogradan fácilmente al enfriarse (Gunaratne & Hoover, 2002). De igual manera, Slattery et al. (2000) sostienen que, la cantidad relativa de amilosa y amilopectina condiciona la funcionalidad específica del almidón. En la industria alimentaria, almidones con alta proporción de amilosa se usan en snacks para crear la crujencia y actúan como barrera impidiendo la penetración del aceite durante la fritura; en la producción de geles actúan como fuerte agente gelificante



produciendo un rápido cuajado y en caramelos como película de revestimiento. Sin embargo, altos niveles de amilosa ocasionan problemas de retrogradación cuando el almidón se recristaliza. Por otro lado, almidones con alto contenido de amilopectina se usan para mejorar la uniformidad, estabilidad, textura de alimentos y su estabilidad en el congelado y descongelado.

Dentro de este contexto, se puede afirmar que los almidones de cañihua evaluados, en relación de su contenido de amilosa y amilopectina, pueden ser beneficiosamente utilizadas en la industria alimentaria.

4.2 Propiedades funcionales de los almidones de cañihua

4.2.1 Poder de hinchamiento (PH), Índice de solubilidad en agua (IS) y Capacidad de absorción de agua (CAA)

El PH indica la capacidad del almidón para hidratarse bajo condiciones de cocción específicas. El inicio del hinchamiento es un indicador del grado de retención de agua de los gránulos durante el calentamiento (Kaur et al., 2007; Pérez-Pacheco et al., 2014). La CAA representa la cantidad de agua que el gránulo de almidón es capaz de absorber (Pérez-Pacheco et al., 2014), mientras que el porcentaje de IS del almidón indica la capacidad que tienen los sólidos de almidón para dispersarse en solución acuosa, durante el proceso de hinchamiento (Falade et al., 2015).

Los valores obtenidos de PH, IS y CAA del almidón de las tres variedades de cañihua evaluados a diferentes temperaturas de calentamiento, difieren significativamente ($p < 0,05$). En las Tablas 5, 6 y 7, se observan que estos valores se encuentran influenciados directamente con el incremento de la temperatura en el cual fueron evaluados ($45^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$), de esta manera, se muestra un incremento de los valores de PH, IS y CAA, a medida que la temperatura ascendía. Respecto a esto, Jan et al. (2017) y Li et al. (2016) reportaron comportamientos similares en almidones de quinua, los



cuales mostraron mayor PH e IS con el aumento de temperatura el cual oscilaba de 55 a 95 °C. Con respecto a esto, Kong et al. (2015) y Adebowale & Lawal (2003), sostienen que, el aumento de temperatura debilita las fuerzas asociativas internas que mantienen la estructura granular de los almidones nativos, facilitando así el hinchamiento a medida que la temperatura aumenta, así mismo, Adebowale & Lawal (2003), indican que el aumento de la solubilidad es consecuencia de la capacidad del solvente (agua) de disolver más de la fracción soluble a medida que aumenta la temperatura.

El valor del PH de los almidones a 75°C, osciló de 14.24 a 15.07 (g/g), presentando el almidón Illpa INIA el valor más bajo, mientras que el valor más alto lo presentó el almidón Cupi. Similares valores obtuvieron: Jan et al. (2017), quienes reportaron que el máximo PH para almidones de dos variedades de quinua fue de 12.53 y 13.89 (g/g). De igual manera, Li et al. (2016), reportaron que el PH de 26 almidones de quinua, mostraron un aumento constante con la temperatura el cual oscilaba de 55°C a 95°C, siendo el PH de las muestras de almidón a 55°C de 3.3 – 12.7(g/g), a 85°C de 19.0 – 33.2 (g/g) y a 95°C de 21.0 - 40.0 (g/g). Así mismo Kong et al. (2009), sostienen que, para el almidón de amaranto, el PH a 85°C oscila entre 9 a 20 (g/g).

El porcentaje de IS, a 75°C, estuvo en un rango de 23.71 a 27.92(%), siendo el almidón Illpa INIA el que presentó el valor más bajo, mientras que el almidón Ramis presentó el valor más alto. Similares valores se reportaron para otros pseudocereales como la quinua y el amaranto, tal como lo indica Li et al. (2016) quienes señalan que, el porcentaje de IS aumentó con la temperatura continuamente en 26 muestras de almidón de quinua, presentando a 55°C un rango de 0.4 a 6.4%, a 85°C un rango de 21.6 a 75.7% y finalmente a 95°C presentaron un rango de 41.1 a 86.9%; mientras que, Kong et al. (2009) reportaron un rango de IS para almidón de amaranto a 85°C de 16 a 95%.



La CAA se relaciona con el PH. De acuerdo a los resultados, la CAA a 75°C tuvo el valor más bajo de 10.72 g/g para el almidón Ramis y el valor más alto de 11.25 (g/g) para el almidón Cupi. Robles (2012), menciona que, el PH permite analizar el incremento del tamaño de gránulo por efecto de la expansión relacionándose con la CAA de cada gránulo.

En general el almidón de las tres variedades de cañihua evaluados, presentaron menor PH y CAA con respecto al IS, el cual fue mayor. Las diferencias entre el PH y porcentaje de IS de los almidones, se atribuyen a las variaciones en el contenido de amilosa, la cual actúa como diluyente e inhibe el hinchamiento (Oladebeye et al., 2009; Hoover & Ratnayake, 2002). Así mismo, Eliasson & Gudmundsson (2006), indican que, las variaciones pueden surgir de las diferentes condiciones experimentales en el método. Un tiempo de retención prolongado aumenta la solubilidad, y si el tratamiento mecánico es severo, esto también cambiará la naturaleza del material solubilizado, aumentando la solubilidad.

Jan et al. (2016), con respecto al porcentaje de IS alto, sostienen que, la suspensión acuosa de almidón cuando se calienta por encima de la temperatura de gelatinización produce la distracción de la estructura cristalina del almidón y la exposición de las moléculas de agua a grupos hidroxilo de amilosa y amilopectina a través del enlace de hidrógeno, lo que resulta en hinchazón de las moléculas de almidón y aumenta la solubilidad debido a la lixiviación de algunos almidones solubles en líquido. De otro lado, Yuan et al. (2007), indican que, en el porcentaje de índice de solubilidad se refleja también la influencia del contenido de lípidos en el almidón; un almidón con menor contenido de lípidos será más soluble que aquel cuyo contenido es mayor debido a que los lípidos son insolubles en agua y tienden a evitar la interacción entre las moléculas del almidón con el agua y como consecuencia, a evitar o disminuir su solubilidad.

Tabla 4.
Poder de hinchamiento de los almidones de cañihua

Variedad de almidón de cañihua	Poder de Hinchamiento (g/g)			
	45°C	55°C	65°C	75°C
CUPI	7.98 ^c ± 0.002	9.30 ^c ± 0.003	12.07 ^c ± 0.003	15.07 ^c ± 0.005
ILLPA INIA	4.80 ^a ± 0.007	8.62 ^a ± 0.003	11.86 ^b ± 0.001	14.24 ^a ± 0.005
RAMIS	5.11 ^b ± 0.001	8.99 ^b ± 0.001	11.37 ^a ± 0.014	14.87 ^b ± 0.005

Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher (p<0.05)

Tabla 5.
Porcentaje de índice de solubilidad en agua de los almidones de cañihua

Variedad de almidón de cañihua	Índice de Solubilidad (%)			
	45°C	55°C	65°C	75°C
CUPI	13.71 ^c ± 0.025	14.29 ^b ± 0.025	23.52 ^c ± 0.017	25.36 ^b ± 0.025
ILLPA INIA	11.17 ^a ± 0.017	13.92 ^a ± 0.025	20.12 ^a ± 0.01	23.71 ^a ± 0.025
RAMIS	13.38 ^b ± 0.01	16.39 ^c ± 0.01	20.56 ^b ± 0.1	27.92 ^c ± 0.025

Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher (p<0.05)

Tabla 6.
Capacidad de absorción de agua de los almidones de cañihua

Variedad de almidón de cañihua	Capacidad de absorción de agua (g/g)			
	45°C	55°C	65°C	75°C
CUPI	6.89 ^c ± 0.0001	7.97 ^c ± 0.0001	9.23 ^b ± 0.0001	11.25 ^c ± 0.0002
ILLPA INIA	4.26 ^a ± 0.007	7.42 ^a ± 0.001	9.47 ^c ± 0.0003	10.86 ^b ± 0.0005
RAMIS	4.42 ^b ± 0.0003	7.52 ^b ± 0.0003	9.03 ^a ± 0.0003	10.72 ^a ± 0.0003

Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher (p<0.05)

4.3 Comportamiento Reológico

4.3.1 Barrido de temperatura

El barrido de temperatura del almidón de las tres variedades de cañihua a diferentes suspensiones almidón: agua (1:9; 2:8; 3:7), se presenta en la Tabla 7, se muestra que hubo diferencia significativa entre las variedades en cuanto a las suspensiones 1:9 y 3:7.

Tabla 7.
Temperatura de formación de gel de los almidones de cañihua

Variedad de almidón de cañihua	Temperatura de inicio de gelatinización		
	Suspension 1:9	Suspensión 2:8	Suspensión 3:7
CUPI	49.11 ^a ± 0.72	45.82 ^a ± 0.04	45.78 ^b ± 0.02
ILLPA INIA	49.96 ^{ab} ± 0.25	45.85 ^a ± 0.03	45.82 ^b ± 0.03
RAMIS	50.12 ^b ± 0.14	46.54 ^a ± 0.65	45.40 ^a ± 0.05

Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher ($p < 0.05$)

La temperatura de inicio de gelatinización para la suspensión 1:9 oscila entre 49.11 - 50.12 °C, mostrando el almidón de la variedad Ramis, la temperatura de gelatinización más alta y la temperatura de gelatinización más baja fue para el almidón de la variedad Cupi. Mientras que para la suspensión 2:8, se encuentra en un rango de 45.82 - 46.54°C, siendo la temperatura de gelatinización mas baja para el almidón de la variedad Cupi y la mas alta para el almidón de la variedad Ramis, aunque no difieren significativamente entre cada variedad. De otro lado, la evaluación a una suspensión 3:7 indica que la formación de gel se da en un rango de temperatura de 45.40 - 45.82 °C, del cual la temperatura de gelatinización mas alta fue necesaria para el almidón Illpa INIA y la mas baja para almidón Ramis.

El rango de temperatura para el inicio de gelatinización, del almidón de las tres variedades de cañihua en diferentes suspensiones fluctúan de 45.40 a 50.12 °C. Valores similares fueron reportados por, Pérez – Rea (2014), el cual indica que las propiedades termales de almidón de cañihua indican una temperatura de gelatinización inicial de 49.8 °C, mientras que para almidón de quinua indica una temperatura de 51.9 °C, así mismo para almidón de amaranto reporta que la temperatura de inicio de gelatinización es mayor en comparación con el almidón de cañihua siendo esta de 59.4 °C. Por otro lado, Li et al. (2016), reportaron que la temperatura de inicio de gelatinización de 26 almidones de quinua, oscilaban en un rango de 50.0 – 58.3 °C. Singh et al. (2014), reportaron que la temperatura de inicio de gelatinización de 13 variedades de almidón de Amaranto



Hypochondriacus osciló entre 63.20 – 70.01 °C, mientras que para 8 variedades de almidón de Amaranto Caudatus, osciló entre 60.46 – 63.28 °C.

De acuerdo al análisis, tanto las temperaturas de gelatinización del almidón de cañihua y el almidón de quinua, son menores que la temperatura de gelatinización del almidón de amaranto, lo que evidenciaría menor tiempo de cocción para almidones de quinua y cañihua. Esto se puede conferir al contenido de amilosa que presentan los pseudocereales. Debido a que la amilopectina desempeña un papel importante en la cristalinidad de los gránulos de almidón, la presencia de amilosa reduce la temperatura de fusión de las regiones cristalinas y la energía para comenzar la gelatinización (Flipse et al., 1996). Se necesita más energía para iniciar la fusión en ausencia de regiones amorfas ricas en amilosa (Krueger et al., 1987). Esta correlación indica que el almidón con un mayor contenido de amilosa tiene una región más amorfa y menos cristalina, bajando la temperatura de gelatinización y la entalpía endotérmica (Sasaki et al., 2000). De acuerdo a esto, cabe indicar que, el contenido de amilosa de almidón de cañihua es ligeramente mayor que el del almidón de quinua, mientras que ambos pseudocereales presentan mucho más altos contenidos de amilosa que el almidón de amaranto, por lo se puede corroborar lo mencionado anteriormente.

Por otro lado, para el caso de las concentraciones almidón: agua en las diferentes suspensiones, se puede observar de los datos de la Tabla 7, que existe una ligera similitud de temperatura de inicio de gelatinización para el almidón de las tres variedades de cañihua en las suspensiones 2:8 y 3:7, acorde a esto, Waigh et al. (2000) sostiene que, la similitud entre el inicio de gelatinización a altas y limitantes concentraciones de agua se pueden explicar de la siguiente manera: Los anillos de crecimiento semicristalinos concéntricos en el exterior de los gránulos son los primeros que tienen acceso al agua disponible. Esta parte del gránulo gelatinizará y retendrá el agua. Como resultado, hay un



exceso de agua en el exterior del gránulo tanto en altas como en límites concentraciones de agua durante el inicio de la gelatinización. Por esta razón, se puede dar inicialmente en ambos casos, resultados con similar temperatura inicial para gelatinización.

Así mismo, si bien es cierto, se observa la ligera similitud entre las temperaturas de inicio de gelatinización en las suspensiones 2:8 y 3:7, cabe destacar que estas, empiezan a gelatinizar a temperaturas menores en comparación a la suspensión 1:9, sin embargo, a su vez, presentarían desventajas debido a la cantidad insuficiente de agua, ya que, no estarían completamente gelatinizadas y solo lo estarían los anillos concéntricos situados en el exterior del granulo, por el cual los gránulos de almidón no llegan a hincharse completamente y solo una parte de ellos, pudiendo llegar a tener una temperatura máxima de gelatinización más alta, lo que genera que estas dos suspensiones tiendan a tener una textura más sólida. Con respecto a esto, Tsai et al. (1997), indica que, con el aumento de temperatura, la estructura del gel se destruye durante el calentamiento prolongado. Eliasson (1986), sostiene que esta destrucción se debe a la fusión de la región cristalina que queda en el granulo del almidón, que deforma y afloja las partículas. De igual forma, Baks et al. (2007), indican que, debido a que toda el agua ha sido absorbida y unida por la fracción de almidón gelatinizado en los anillos de crecimiento concéntricos en el exterior del gránulo, no hay agua disponible para inducir hinchazón e interrupción del resto del gránulo de almidón a altas proporciones de almidón-agua. Por esta razón, se forma una mezcla heterogénea que consiste en almidón gelatinizado amorfo y una parte que ha permanecido semicristalina. Waigh et al. (2000) sostienen que, la pérdida completa de cristalinidad solo se puede lograr aumentando aún más la temperatura que resulta en la fusión de fracción de almidón semicristalino. Así mismo, Baks et al. (2007) indican que, se requiere un aumento de temperatura porque la cantidad de agua en la fracción de almidón restante es muy baja.

Caso contrario sucede cuando las suspensiones tienen mayor cantidad de agua, como la suspensión 1:9, que tienden a gelatinizar completamente. Con respecto a esto, Vaclavick (2002), indica que, la energía cinética de las moléculas de agua caliente rompe los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón. A medida que se forman puentes de hidrógeno, el agua es capaz de penetrar más profundamente en el gránulo de almidón y tiene lugar el hinchamiento. Debe estar presente suficiente cantidad de agua para entrar y agrandar el gránulo de almidón. Ahmed et al. (2012), indican que el hinchamiento y la posterior solubilización de amilosa y amilopectina son los cambios estructurales más importantes durante y después de la gelatinización de los gránulos de almidón.

4.3.2 Barrido de frecuencia

El barrido de frecuencia se realizó dentro de la Región Viscoelástica Lineal (RVL). Los espectros mecánicos que representan el Módulo de almacenamiento (G') y el Módulo de pérdida (G'') en función de la frecuencia angular (ω) para el almidón de las tres variedades de cañihua (Cupi, Illpa INIA y Ramis) a diferentes suspensiones, se muestran en las Figuras 10 (A y B), 11 (A y B), y 12 (A y B), donde se observa que, G' fue mayor que G'' , lo que indica que hubo un predominio elástico sobre el comportamiento viscoso en todas las variedades y suspensiones, mostrando un comportamiento típico para estructuras gelificadas principalmente debido al reordenamiento de componentes de amilosa (Nazir et al., 2017). La amilosa lixiviada, al enfriar, se fija mediante enlaces de hidrógeno, restringiendo el movimiento de las moléculas o partículas (Li & Zhu, 2018). Así mismo, Steffe (1996), define el comportamiento del material o sustancia como una solución diluida, concentrada o gel. Para una solución diluida, G'' es mayor que G' en todo el rango de frecuencias pero se acercan entre sí a frecuencias más altas, mientras que para una solución concentrada G' y G'' se interceptan en el medio del rango de frecuencia, mostrando una tendencia más

sólida a altas frecuencias, por otro lado, cuando G' es significativamente mayor que G'' durante todo el rango de frecuencia se le denomina gel.

Por otro lado, Mezger (2010) sostiene que, dentro de las dispersiones y geles estables, las fuerzas de interacción intermolecular están formando una red de fuerzas tridimensionales. Este tipo de materiales muestran curvas $G' > G''$ que a menudo se presentan en forma de líneas rectas casi paralelas a lo largo de todo el rango de frecuencias mostrando solo una ligera pendiente, además, indica que, el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') presentan principalmente la siguiente relación: $G' : G'' = 10 : 1$ (Pa).

Así mismo Mezger (2010), sostiene que:

1. Si $G' \geq 10$ Pa, se puede asumir una cierta estabilidad de dispersión o estabilidad de gel.
2. Sin embargo, si $G' \leq 1$ Pa, la estabilidad relacionada con el uso práctico apenas existe.
3. Para valores G' intermedios, se deben realizar más pruebas (por ejemplo, analizar el "límite de fluencia").

Acorde a esto, en la figura 9 (A y B) se muestra que las variedades de almidón estudiadas a la suspensión 1:9, cumplen con la relación $G' : G''$ indicado por Mezger (2010), es decir, los datos aproximados del módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida para el caso del almidón de la variedad Ramis presentan la relación $G' : G'' = 10 : 1$ (Pa), mientras que para el almidón de la variedad Illpa INIA $G' : G'' = 100 : 10$ (Pa), y para el almidón de la variedad Cupi $G' : G'' = 1000 : 100$ (Pa). Así mismo, también se concluye que los geles de todas las variedades presentan cierta estabilidad, dado a que $G' \geq 10$ Pa, sin embargo, la estabilidad en términos de consistencia del gel de almidón de la variedad Cupi es mayor que el gel de las variedades Illpa INIA y Ramis, debido a que el módulo de almacenamiento (G') de la variedad Cupi, presenta valores superiores claramente diferenciativas a las otras variedades.



Por otro lado, la figura 10 (A y B) muestra que al aumentar la concentración de almidón: agua en 2:8, el módulo de almacenamiento (G') presenta valores aproximados a 10 000 Pa, siendo estos superiores a los que presenta la suspensión 1:9, así mismo, no se cumple la relación $G': G'' = 10: 1$ (Pa), debido a que la separación entre los módulos es mayor. Respecto a esto, entre más grande es la diferencia entre los módulos G' y G'' , la suspensión muestra propiedades de un sólido o un fluido puro respectivamente (Huang, Li, & Sumner, 2011; Welte-Chanes & Aguilera, 2002). Acorde a esto, aumentar la concentración en 2:8 ha influido en que los geles de almidón presenten estructuras más sólidas y estables en el almidón de las tres variedades.

En la figura 11 (A y B) se observa que los datos de G' en la suspensión 3:7, para todas las variedades de almidón de cañihua estudiados, han disminuido, encontrándose alrededor de 1000 Pa, en este caso la mayor concentración no ha influido para que G' pueda mostrar valores que indiquen a su vez mejor estructura y estabilidad de los geles, sino por el contrario, estos resultados indican que las estructuras han disminuido su consistencia y estabilidad, probablemente esto haya sucedido debido a la cantidad insuficiente de agua, lo que ocasionó una saturación, por lo que no todos los gránulos han logrado absorber todo el agua, así mismo, al final de la prueba la suspensión se volvió rígida. Baks et al. (2007), indican que, debido a que toda el agua ha sido absorbida y unida por la fracción de almidón gelatinizado en los anillos de crecimiento concéntricos en el exterior del gránulo, no hay agua disponible para inducir hinchazón e interrupción del resto del gránulo de almidón a altas proporciones de almidón-agua. Por esta razón, se forma una mezcla heterogénea que consiste en almidón gelatinizado amorfo y una parte que ha permanecido semicristalina.

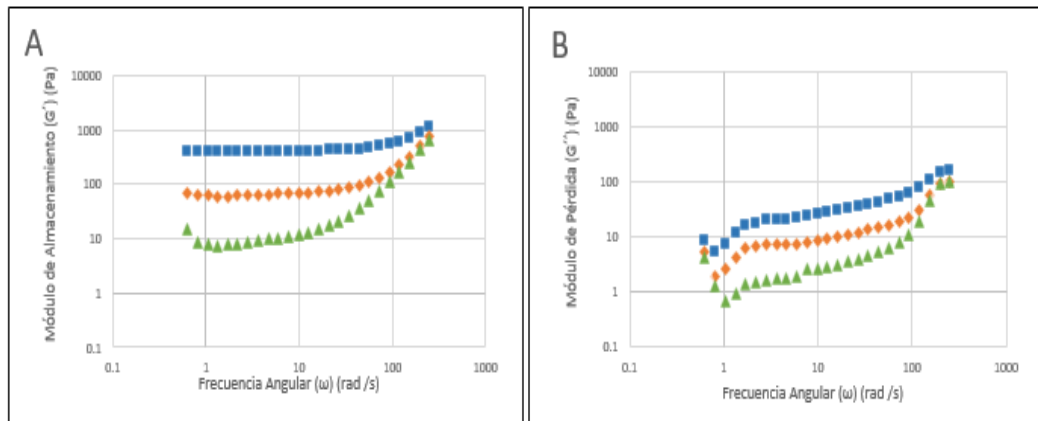


Figura 9. Espectros mecánicos en función de la frecuencia angular a suspensión 1:9 (cañihua: agua) del almidón de tres variedades de cañihua. A. módulo de almacenamiento, G' (Pa); y, B. módulo de pérdida, G'' (Pa). almidón Cupi (\square), almidón Illpa Inia (\diamond) y almidón Ramis (\triangle).

Fuente: Elaboración propia

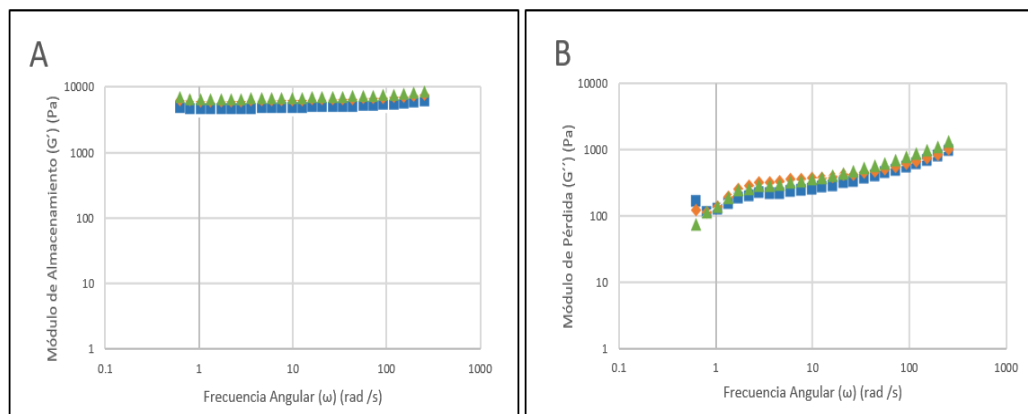


Figura 10. Espectros mecánicos en función de la frecuencia angular a suspensión 2:8 (cañihua: agua) del almidón de tres variedades de cañihua. A. módulo de almacenamiento, G' (Pa); y, B. módulo de pérdida, G'' (Pa). almidón Cupi (\square), almidón Illpa Inia (\diamond) y almidón Ramis (\triangle).

Fuente: Elaboración propia

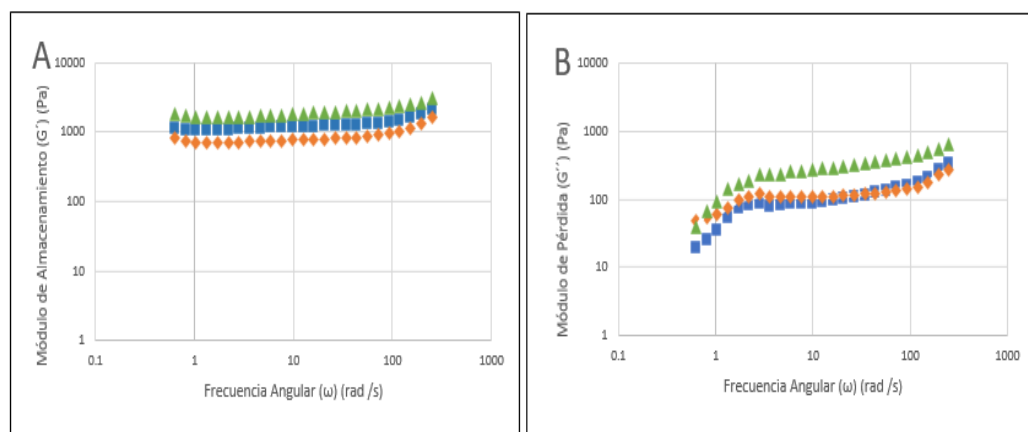


Figura 11. Espectros mecánicos en función de la frecuencia angular a suspensión 3:7 (cañihua: agua) del almidón de tres variedades de cañihua. A. módulo de almacenamiento, G' (Pa); y, B. módulo de pérdida, G'' (Pa). almidón Cupi (\square), almidón Illpa Inia (\diamond) y almidón Ramis (\triangle).

Fuente: Elaboración propia



Resultados similares fueron reportados por Galkowska et al. (2014), quienes indican que, los espectros obtenidos a 25 ° C para geles de almidón de papa y maíz, mostraron un predominio de elasticidad sobre los viscosos, siendo G' mayor que G'' . De igual forma, Li & Zhu (2018), indicaron el predominio mayor de G' sobre G'' en 9 muestras de almidón de quinua, caracterizándolos como muestras con comportamiento elástico.

De acuerdo a lo antes mencionado, el comportamiento elástico de las muestras de almidón en la industria alimentaria va a permitir modificar la textura de los alimentos, ya que si se desea obtener una textura más sólida se buscan comportamientos con un componente elástico mayor, mientras que si se desean productos con características líquidas se debe buscar aumentar el comportamiento viscoso, estas características definen la calidad sensorial de los productos.

El rango de valores de $\tan\delta$ (G''/G') se muestran en la Figura 12, siendo las siguientes para la suspensión 1:9: Cupi: 0.013 – 0.174 ; Illpa INIA: 0.032 – 0.191 y Ramis: 0.100 – 0.252, mientras que para la suspensión 2:8 fueron: Cupi: 0.024 – 0.153; Illpa INIA: 0.018 – 0.132 y Ramis: 0.011 – 0.151; finalmente para la suspensión 3:7 fueron: Cupi: 0.017 – 0.158; Illpa INIA: 0.058 – 0.162 y Ramis: 0.021 – 0.206. Todos los valores de $\tan\delta$, a diferentes suspensiones para todas las muestras en el rango de frecuencia estudiado, fueron menores a 1. Funami (2016), indica que los valores de $\tan\delta < 1$ indican principalmente propiedades elasticas y para un sólido perfectamente elástico $\tan\delta = 0$.

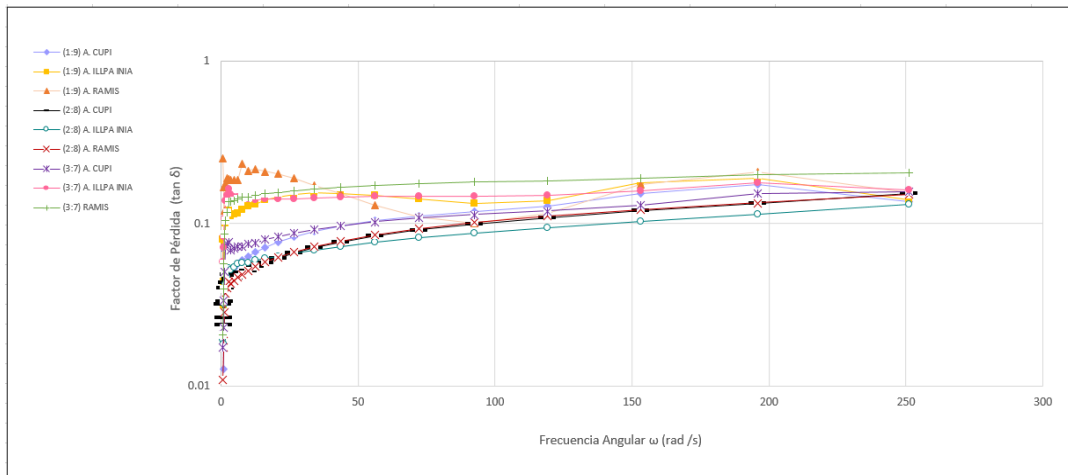


Figura 12. Factor de pérdida en función de la frecuencia angular para almidones de cañihua (Cupi, Illpa INIA y Ramis) a suspensiones 1:9; 2:8 y 3:7.

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se observa que, en la suspensión 2:8, los valores de $\tan \delta$ están más alejados de 1 y más cercanos a 0 en comparación de las suspensiones 1:9 y 3:7, por lo que el almidón de las tres variedades de cañihua en suspensión 2:8 presentan mejores propiedades elásticas considerándose estructuras gelificadas más estables, por otro lado, en la suspensión 1:9, el gel de almidón de la variedad Cupi, presenta mejor comportamiento elástico que las variedades Illpa INIA y Ramis, debido a que el valor $\tan \delta$ es más próximo a 0. En el caso de la suspensión 3:7 no ha influido la concentración en la firmeza de los geles de almidón en las tres variedades, corroborando los resultados dados por los espectros mecánicos G' y G'' , que de manera similar indican los mismos comportamientos.

Los geles se pueden clasificar como "gel verdadero" o "gel fuerte" y "gel débil", la diferencia se da en la estabilidad de la red a diferentes frecuencias (Rao, 1999). El almidón de las tres variedades de cañihua a la suspensión 1:9, mostraron que ambos módulos (G' y G'') fueron casi paralelos al inicio del barrido, pero finalmente dependieron de la frecuencia angular, por lo que se pueden caracterizar como geles débiles (Ikeda & Nishinari, 2001; Picout & Ross-Murphy, 2003; Seo & Yoo, 2012). Tal

como se muestra en la Figura 9A, G' mostró un ligero incremento con el aumento de la frecuencia oscilatoria para la suspensión 1:9. Al respecto, Stading et al. (1992), indican que, la dependencia del módulo elástico con la frecuencia, da información sobre el tipo de estructura que presenta el gel. Khondkar et al. (2007), mencionan que los geles débiles poseen propiedades reológicas intermedias entre soluciones y geles fuertes, y que, bajo condiciones de deformación pequeñas, los geles débiles se asemejan a los geles fuertes en su comportamiento mecánico. Así mismo, los geles débiles contienen enlaces cruzados que pueden romperse y reformarse, tal como geles coloidales y algunos geles de biopolímeros (Richter, 2007; Solomon & Spicer, 2010). Así mismo, estas características sugieren que las muestras podrían contribuir a formar un bolo con una consistencia de gel débil, fácil de masticar y tragar (Ishihara et al., 2011). De igual manera, Nakauma et al. (2011), indican que, reológicamente, un gel débil, es una estructura alimentaria requerida para deglución fácil y segura.

Por otro lado, las suspensiones 2:8 y 3:7, se pueden caracterizar como geles fuertes debido a que, G' es estable y se mantiene relativamente constante, casi independiente de la frecuencia durante el barrido. Li & Zhu (2018), reportaron características similares, reportando que 9 muestras de almidones de quinua presentaban comportamientos elásticos con clasificación de gel fuerte, ya que G' era casi independiente de la frecuencia. Cabe indicar que, esta característica confiere estructuras más rígidas y consistentes al gel.

4.3.3 Curva de fluidez y Viscosidad

En la Figura 13, se presenta el comportamiento de viscosidad vs. velocidad de deformación de los geles de almidón de las tres variedades de cañihua a diferentes suspensiones. Se observa que la viscosidad en todas las suspensiones estudiadas (1:9; 2:8 y 3:7), disminuye con el aumento de la velocidad de deformación, así mismo, se muestra que los geles de almidón de las tres variedades de cañihua en suspensión 2:8 presentan



mayor viscosidad, es decir, mayor resistencia a fluir, seguido de la suspensión 1:9, dentro del cual el almidón de la variedad Cupi, presenta mayor resistencia al flujo, lo que indica que es más espeso en comparación de la variedad Illpa INIA y Ramis, de igual manera, en la suspensión 3:7, el almidón de la variedad Cupi, presento mayor resistencia al flujo en comparación de las dos variedades de almidón de cañihua restantes, antes mencionadas.

Sharma (2000), indica que este comportamiento es el más común dentro de los fluidos No newtonianos – Pseudoplasticos, y se caracteriza porque su curva en el reograma es convexa con respecto al eje de esfuerzo cortante. En ellos la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de cizalla, es decir son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizallan lentamente. La razón de este comportamiento al flujo es que al incrementarse el gradiente de velocidad se deforma y/o se reordenan las partículas en suspensión del fluido, originándose una menor resistencia al flujo y obteniéndose como consecuencia una menor viscosidad.

Esto es similar a lo reportado sobre otros almidones como el amaranto y el maiz (Kong et al., 2010; Zhu et al., 2016). Cuando la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de deformacion, se sugiere que todas las muestras presentan propiedades de Fluidos No Newtonianos (Zhuang, 2019).

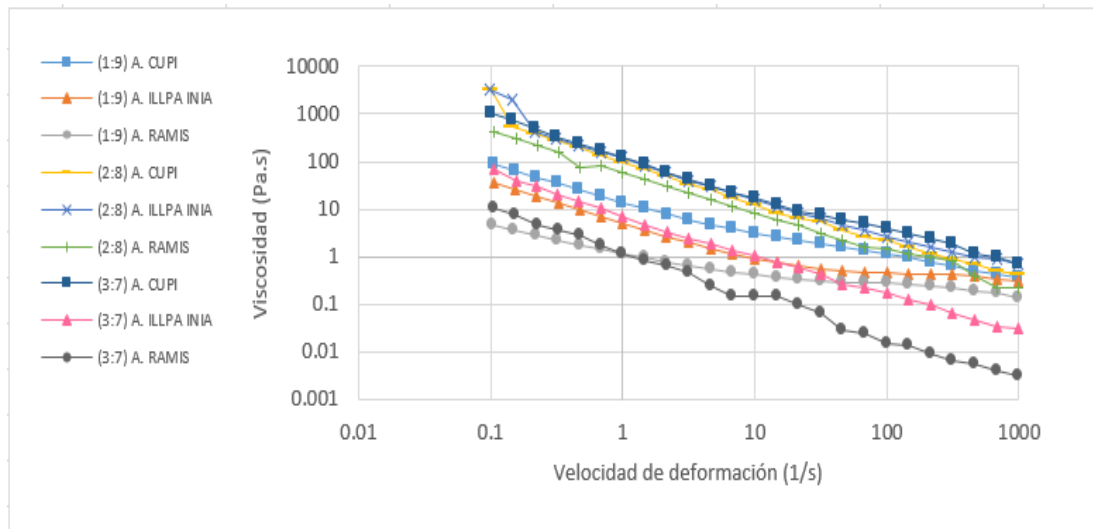


Figura 13. Viscosidad en función de la velocidad de deformación para almidones de cañihua (Cupi, Illpa Inia y Ramis) a suspensiones 1:9; 2:8 y 3:7.

Fuente: Elaboración propia

Para modelar la curva de flujo, se utilizó la ecuación del modelo de Herschel – Bulkey, este modelo describe muy bien sistemas de almidones en gel, incluso a bajas velocidades de corte (Kong et al., 2010; Li & Zhu, 2017). Los parámetros de esfuerzo de fluencia (σ_0), índice de comportamiento de flujo (n), coeficiente de consistencia (K) y coeficiente de determinación (R^2) se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Parámetros reológicos de almidón de cañihua (Cupi, Illpa INIA y Ramis) a diferentes suspensiones cañihua: agua (1:9; 2:8 y 3:7)

Variedades	Suspensiones											
	1:9				2:8				3:7			
	σ_0	K	n	R^2	σ_0	K	n	R^2	σ_0	K	n	R^2
Cupi	8.325 ^c	5.535 ^b	0.619 ^a	0.99	49.85 ^b	20.60 ^a	0.424 ^b	0.98	97.78 ^c	8.644 ^c	0.732 ^c	0.94
	± 0.11	± 0.47	± 0.01		± 1.90	± 2.30	± 0.02		± 0.05	± 0.15	± 0.01	
Illpa INIA	1.238 ^b	0.417 ^a	0.766 ^b	0.99	65.53 ^c	42.38 ^b	0.364 ^a	0.98	5.89 ^b	1.260 ^b	0.459 ^b	0.97
	± 0.03	± 0.07	± 0.03		± 1.88	± 2.18	± 0.01		± 0.22	± 0.26	± 0.05	
Ramis	0.346 ^a	0.775 ^a	0.759 ^b	0.99	36.33 ^a	17.97 ^a	0.384 ^a	0.91	0.94 ^{a±}	0.115 ^a	0.375 ^a	0.93
	± 0.02	± 0.03	± 0.004		± 1.31	± 1.88	± 0.02		0.02	± 0.02	± 0.03	

σ_0 : Esfuerzo de fluencia (Pa) K: coeficiente de consistencia (Pa.sⁿ) n: índice de comportamiento de flujo (adimensional) R^2 : coeficiente de determinación. Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Fisher ($p < 0.05$)

El índice de comportamiento de flujo (n), significa la desviación de la muestra del flujo newtoniano, donde $n=1$ (Alamri et al., 2012). Como se puede observar, en la suspensión 1:9, el valor del parámetro “ n ”, oscila entre 0.619 (almidón Cupi) y 0.766

(almidón Illpa INIA), mientras que para la suspensión 2:8, osciló entre 0.364 (almidón Illpa INIA) y 0.424 (almidón Cupi), así mismo, para la suspensión 3:7 osciló entre 0.375 (almidón Ramis) y 0.732 (Almidón Cupi). Estos valores indican que los geles de almidón en todas las suspensiones estudiadas, presentaron un comportamiento No Newtoniano de naturaleza Pseudoplástica (Lee & Chang, 2015), similares resultados fueron reportados por Li & Zhu (2018), quienes indican que los geles de almidón de 9 variedades de quinua, presentaron comportamiento Pseudoplástico, así mismo, la viscosidad disminuyó con el aumento de velocidad de deformación. Kong et al. (2010), indican que, las curvas de flujo de 7 variedades de almidón de amaranto, presentaron el mismo comportamiento Pseudoplástico. De igual manera, Zhu et al. (2016), reportaron comportamiento Pseudoplástico para almidones de maíz.

En todos los casos de los almidones de cañihua estudiados, el índice de comportamiento de flujo es menor que la unidad ($n < 1$). Cuanto más alejado se encuentra de la unidad (fluidos Newtonianos) mayor pseudoplasticidad presenta el producto (Steffe, 1996). De otro lado, Fu et al. (2015) y Amini et al. (2015), mencionan que, el aumento del índice de comportamiento reológico indica una disminución de la pseudoplasticidad.

En cuanto al coeficiente de consistencia (K), para la suspensión 1:9, el almidón de cañihua Cupi, mostró mayor valor (5.535 Pa s^n) en comparación de los almidones Illpa INIA y Ramis (0.417 Pa.s^n y 0.775 Pa.s^n respectivamente), los cuales no muestran diferencia significativa entre ambos, lo que indicaría que el almidón Cupi, tiene mejor comportamiento Pseudoplástico en esta suspensión, debido a que muestra menor comportamiento de flujo. En cuanto a la suspensión 2:8, se puede observar que, el coeficiente de consistencia fue mayor para el almidón Illpa INIA (42.38 Pa.s^n), lo que indica mejor comportamiento Pseudoplástico para esta variedad en la suspensión analizada, seguido por el almidón Cupi (20.60 Pa.s^n) y por último el almidón Ramis



(17.97 Pa.sⁿ). El comportamiento Pseudoplástico está relacionado con la orientación progresiva de moléculas en la dirección de flujo y ruptura de enlaces de Hidrogeno formado en la estructura amilosa – amilopectina – agua durante el cizallamiento (Moreira et al., 2012).

Respecto al esfuerzo de fluencia (σ_0) calculado por extrapolación (Peressini et al., 2003; Zhu et al., 2001; Zimeri et al., 2003), representa la mínima fuerza necesaria para que la muestra empiece a fluir (Mezger, 2006; Guo et al., 2015). En la Tabla 8, se puede observar que para la suspensión 1:9, el esfuerzo de fluencia fue mayor para el gel de almidón de la variedad Cupi (8.325 Pa), mientras que para la suspensión 2:8, los valores fueron mayores para los geles de almidón de las variedades Illpa INIA y Cupi (65.53 Pa y 49.85 Pa respectivamente), esto debido a que presentaron mayor coeficiente de consistencia. Con respecto a estos valores, varias muestras de almidón exhibieron diferentes valores de esfuerzo de fluencia, bajo ciertas concentraciones. Las muestras o dispersiones tipo gel con una gran cantidad de partículas sólidas generalmente tienen un límite de elasticidad o esfuerzo de fluencia mayor (Kong et al., 2010; Zhu et al., 2016; Zhu & Wang, 2012).

De otro lado, se puede observar la influencia de la concentración para el almidón de las tres variedades de cañihua estudiadas. A medida que aumenta la concentración (1:9 a 2:8), este influye directamente proporcional con el aumento del coeficiente de consistencia (K) y el esfuerzo de fluencia (σ_0), mientras que el índice de comportamiento de flujo (n) disminuye. Acorde a esto, Cengiz et al. (2013), menciona que, este fenómeno se puede interpretar en la teoría de los “aglomerados”, al ir aumentando el grado de concentración, las partículas individuales quedarían más próximas unas de otras, facilitando su atracción y posible formación de grumos. Dichos grumos, a su vez, pueden unirse, dando lugar a la formación de agregados, aunque las fuerzas que los mantendrían



unidos serían más débiles que las anteriores. Estos agregados también pueden agruparse para formar una red o malla, entre la que quedaría atrapada la fase dispersante, que sería difícil de separar por la acción de una fuerza centrífuga.

Así mismo, Karazhiyan et al. (2009), Hosseini – Parvar et al. (2010) y Wu et al. (2015), indican que, al aumentar la concentración se aumenta la cantidad de solutos disueltos, lo que acentúa las interacciones polímero – agua, aumentando la resistencia de la disolución que tiene un comportamiento de gel, otorgando una mayor firmeza y elasticidad.

Por otro lado, la suspensión 3:7, no fue influenciado por la concentración, muy por el contrario, para todas las variedades de almidón de cañihua, disminuyeron los valores de coeficiente de consistencia y aumentaron los valores de índice de comportamiento de flujo, exhibiendo mayor fluidez a pesar de presentar la mayor concentración. Con respecto a esto, cabe indicar que, los geles de almidón se tornaron muy rígidos, difícilmente de realizar los análisis a ésta concentración por lo que se puede deducir que influyeron en los resultados del reómetro, siendo estos inexacto

V. CONCLUSIONES

Las características fisicoquímicas, en lo que respecta a la DTP, indica que, el mayor porcentaje de almidón retenido se dio en la malla N° 200 (75 μ m), dentro del cual, la variedad Cupi (46.74%), difiere significativamente con las variedades de almidón Illpa INIA (56.26%) y Ramis (55.20%) las cuales no difieren entre ambas. Por otro lado, los contenidos de amilosa y amilopectina no presentan diferencias entre el almidón de las tres variedades de cañihua evaluados. Estas características pueden ser beneficiosamente utilizadas en la industria alimentaria, para mejorar la uniformidad, estabilidad y textura de alimentos.

Las Propiedades funcionales presentan diferencias entre el almidón de las tres variedades de cañihua evaluados. El almidón de la variedad Cupi presentó mayor PH (15.07g/g) y CAA (11.25 g/g), mientras que el almidón de la variedad Ramis presentó mayor porcentaje de IS (27.92%). Acorde a esto, el almidón de la variedad Cupi, puede ser usado en alimentos que requieren retención de agua, mientras que el almidón de la variedad Ramis tiene mayor capacidad de dispersarse en solución acuosa, tomando menos tiempo en solubilizarse frente a diferentes procesos en los que pueda utilizarse.

El comportamiento reológico del almidón de las tres variedades de de cañihua a diferentes suspensiones, indican que el almidón de la variedad Cupi en suspensión 1:9 y 2:8 y el almidón Ramis en suspensión 3:7, utilizan menor temperatura de gelatinización, lo que indicarían menor tiempo de cocción y gasto de energía durante los procesamientos industriales. Por otro lado, los almidones evaluados, presentaron un comportamiento elástico, propio a geles débiles (suspensión 1:9) y fuertes (suspensiones 2:8 y 3:7), así mismo presentaron un comportamiento de flujo No Newtoniano de naturaleza pseudoplastica, siendo una característica propia de los almidones en general; cabe destacar que a mayor concentración (3:7) la consistencia del almidón tiende a ser



demasiado solida y rigida, dificultando su análisis y por ende no recomendable en futuras aplicaciones alimentarias, mientras que la suspension 2:8, es necesaria para proporcionar características texturales consistentes en los productos alimentarios sin llegar a una rigidez indeseada, de igual manera, la suspensión 1:9, es importante para la innovacion de estructuras alimentarias faciles de masticar, con deglución facil y segura.



VI. RECOMENDACIONES

- ✚ Evaluar el comportamiento de los almidones obtenidos de cañihua en un sistema alimentario, para conocer las alteraciones de sus propiedades en condiciones específicas de procesamiento.

- ✚ Realizar estudios sobre uso y/o aplicación del almidón de las variedades de cañihua estudiados, como nuevo ingrediente en diferentes matrices alimentarias.

- ✚ Evaluar la factibilidad económica que podría resultar de la extracción y por ende comercialización del almidón de cañihua, para convertirlo en un cultivo sostenible que genere ingresos económicos a los campesinos que lo cultiven.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adebowale, K. O., & Lawal, O. S. (2003). Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. *Food Hydrocolloids*, 17(3), 265–272. doi:10.1016/s0268-005x(02)00076-0.
- Ahmed, J., Tiwari, B. K., Imam, S. H., & Rao, M. A. (2012). Starch-based polymeric materials and nanocomposites: chemistry, processing and applications. *Food Science & Technology. Physical Sciences*. doi: 10.1201/b11848.
- Ai, Y., & Jane, J.-L. (2015). Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch/Starke*, 67, 213–224. doi: 10.1002/star.201400201.
- Alamri, M. S., Mohamed, A. A., & Hussain, S. (2012). Effect of okra gum on the pasting, thermal, and viscous properties of rice and sorghum starches. *Carbohydrate Polymers*, 89(1), 199–207. doi: 10.1016/j.carbpol.2012.02.071.
- Alonso, M. L., Larrodé, O., & Zapico, J. (1995). Rheological Behaviour of Infant Foods. *Journal of Texture Studies*, 26(2), 193–202. doi:10.1111/j.1745-4603.1995.tb00793.x
- Amini, A. M., Razavi, S. M. A., & Mortazavi, S. A. (2015). Morphological, physicochemical, and viscoelastic properties of sonicated corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 122, 282–292. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.01.020.
- Apaza, V. (2010). *Manejo y Mejoramiento de Kañiwa*. Convenio Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA. Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente-CIRNMA. Bioersity International y el International Fund for Agricultural Development-IFAD. Puno, Perú.
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Astete, A. (2002). *La estructura genética y sus implicancias en el mejoramiento de caracteres cuantitativos en la Kañiwa (Chenopodium pallidicaule Aellen)*. En: 2° Mesa Redonda Internacional. Perú – Bolivia: sobre papas de altura y kañiwa.
- Baks, T., Ngene, I. S., van Soest, J. J. G., Janssen, A. E. M., & Boom, R. M. (2007). Comparison of methods to determine the degree of gelatinisation for both high and low starch concentrations. *Carbohydrate Polymers*, 67(4), 481–490. doi: 10.1016/j.carbpol.2006.06.016.



- Barbosa-Cánovas, G. V., Ibarz, A., & Peleg, M. (1993). *Propiedades reológicas de alimentos fluidos*. *Revisión Alimentaria*, 241, 39-89.
- Barnes, H. A. (2001). An examination of the use of rotational viscometers for the quality control of non-Newtonian liquid products in factories. *Applied Rheology*, 11(2), 89–101. doi:10.1515/arh-2001-0006
- Bartolo, D. (2013). *Propiedades nutricionales y antioxidantes de la Cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen)*. *Revista de Investigación Universitaria*, (2), 47 – 53.
- BeMiller, J. N. (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 386–423. doi:10.1016/j.carbpol.2011.05.064
- Bourne, M.C. (1982). *Food Texture and Viscosity : Concept and Measurement*. Academic Press, New York, 325 p.
- Cano, J. (1971). *Biología floral de la Cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen)*. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.
- Cengiz, E., Dogan, M., & Karaman, S. (2013). Characterization of rheological interactions of Gleditsia triacanthos gum with some hydrocolloids: Effect of hydration temperature. *Food Hydrocolloids*, 32(2), 453–462. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.01.018.
- Cheftel, J.C., Cheftel, H., & Besancon, P. (1983). *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos*. Zaragoza, España. Editorial Acribia.
- Choi, C. R., Choi, H. J., Kim, S. R., Lee, J. H., & Shin, M. S. (2000). Comparison of characteristics of amaranth starches isolated from five cultivars grown in Korea. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 32, 252–257.
- Choi, H., Kim, W., & Shin, M. (2004). Properties of Korean Amaranth Starch Compared to Waxy Millet and Waxy Sorghum Starches. *Starch / Starke*, 56 (10), 469 – 477. doi: 10.1002/star.200300273.
- Cui, S. (2005). *Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications*. Florida, US. Editorial CRC Press.
- Eliasson, A. -C. (1986). Viscoelastic behaviour during the gelatinization of starch I. Comparison of wheat, maize, potato and waxy-barley starches. *Journal of Texture Studies*, 17(3), 253–265. doi:10.1111/j.1745-4603.1986.tb00551.x.
- Eliasson, A. -C. (2006). Carbohydrates in food. 2ed. *Carbohydrate Polymers*, (69), 202-203. doi: 10.1016/j.carbpol.2006.08.001



- Eliasson, A.-C., & Gudmundsson, M. (2006). *Starch: physicochemical and functional aspects*. In: Eliasson, A.-C. (Ed.). *Carbohydrates in Food*, 2nd ed. Boca Ratón, Florida. Taylor & Francis Group.
- Falade, K. O., & Christopher, A. S. (2015). Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars. *Food Hydrocolloids*, 44, 478–490. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.10.005.
- Flipse, E., Keetels, C. J. A. M., Jacobsen, E., & Visser, R. G. F. (1996). The dosage effect of the wildtype GBSS allele is linear for GBSS activity but not for amylose content: absence of amylose has a distinct influence on the physico-chemical properties of starch. *Theoretical and Applied Genetics*, 92(1), 121–127. doi:10.1007/bf00222961.
- Fu, Z., Luo, S.-J., BeMiller, J. N., Liu, W., & Liu, C.-M. (2015). Effect of high-speed jet on flow behavior, retrogradation, and molecular weight of rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 133, 61–66. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.07.006.
- Funami, T. (2016). The Formulation Design of Elderly Special Diets. *Journal of Texture Studies*, 47(4), 313–322. doi: 10.1111/jtxs.12202.
- Gałkowska, D., Pycia, K., Juszczak, L., & Pająk, P. (2014). Influence of cassia gum on rheological and textural properties of native potato and corn starch. *Starch/Starke*, 66, 1060-1070. doi: 10.1002/star.201400078.
- Gani, A., Nazia, S., Rather, S., Wani, S., Shah, A., Bashir, M., Massodi, F., & Gani, A. (2014). Effect of γ -irradiation on granule structure and physicochemical properties of starch extracted from two types of potatoes grown in Jammu & Kashmir, India. *Food Science and Technology*, 58(1), 239–246. doi: 10.1016/j.lwt.2014.03.008.
- Garcia, O. R., Pinzon, M. I. & Sanchez, L. T. (2012). *Extracción y propiedades funcionales del almidón de yuca, manihot esculenta, variedad ica, como materia prima para la elaboración de películas comestibles*. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 11(1), 13–21.
- Gunaratne, A., & Hoover, R. (2002). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and roots starches. *Carbohydrate Polymers*, 49, 425 – 437. doi: 10.1016/S0144-8617(01)00354-X.
- Guo, Z., Zeng, S., Zhang, Y., Lu, X., Tian, Y., & Zheng, B. (2015). The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch. *Food Hydrocolloids*, 44, 285–291. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.09.014.
- Hernández, J. E., & León, J. (1992). *Cultivos marginados, otra perspectiva de 1942*. Colección FAO: Producción y Protección vegetal N°26. Roma, Italia.



- Holdsworth, S.D. (1971). Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid foods products. *Journal of Texture Studies*, 2(4), 393-418. doi: 10.1111/j.1745-4603.1971.tb00589.x
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253–267. doi:10.1016/s0144-8617(00)00260-5
- Hoover, R., & Ratnayake, W. S. (2002). Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. *Food Chemistry*, 78(4), 489–498. doi:10.1016/s0308-8146(02)00163-2.
- Hosseini-Parvar, S. H., Matia-Merino, L., Goh, K. K. T., Razavi, S. M. A., & Mortazavi, S. A. (2010). Steady shear flow behavior of gum extracted from *Ocimum basilicum* L. seed: Effect of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 236–243. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.06.025.
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (2011). *Soils Physics*. In Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, Second Edition, 3–9.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G.V. (1999). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania.
- Ikedo, S., & Nishinari, K. (2001). “Weak Gel”-Type Rheological Properties of Aqueous Dispersions of Nonaggregated κ -Carrageenan Helices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(9), 4436–4441. doi:10.1021/jf0103065.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (2002). *Informe de Investigación*. Proyecto IFAD – NUS I. Puno.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (2010). *Manejo y Mejoramiento de Kañiwa*. Estación Experimental Agraria Illpa. Puno.
- International Organization for Standardization (ISO) (1987). Determination of amylose content (ISO 6647). Génova, Suiza.
- Ishihara, S., Nakauma, M., Funami, T., Odake, S., & Nishinari, K. (2011). Swallowing profiles of food polysaccharide gels in relation to bolus rheology. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1016–1024. doi: 10.1016/j.foodhyd.2010.09.022.
- Jacobs, H., & Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modifications of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (46), 2895–2905. doi:10.1021/jf980169k
- Jan, K. N., Panesar, P. S., Rana, J. C., & Singh, S. (2017). Structural, thermal and rheological properties of starches isolated from Indian quinoa varieties.



- International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 315–322. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.04.027.
- Jan, R., Saxena, D. C., & Singh, S. (2016). Pasting, thermal, morphological, rheological and structural characteristics of *Chenopodium* (*Chenopodium album*) starch. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 267–274. doi: 10.1016/j.lwt.2015.10.040.
- Jane, J.-L., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H., & Robyt, J. F. (1994). Anthology of Starch Granule Morphology by Scanning Electron Microscopy. *Starch/Stärke*, (46), 121–129. doi: 10.1002/star.19940460402
- Jiang, F., Du, C., Guo, Y., Fu, J., Jiang, W., & Du, S. –K. (2019). Physicochemical and structural properties of starches isolated from quinoa varieties. *Food Hydrocolloids*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105515.
- Karazhiyan, H., Razavi, S. M. A., Phillips, G. O., Fang, Y., Al-Assaf, S., Nishinari, K., & Farhoosh, R. (2009). Rheological properties of *Lepidium sativum* seed extract as a function of concentration, temperature and time. *Food Hydrocolloids*, 23(8), 2062–2068. doi: 10.1016/j.foodhyd.2009.03.019.
- Kaur, A., Singh, N., Ezekiel, R., & Guraya, H. S. (2007). Physicochemical, thermal and pasting properties of starches separated from different potato cultivars grown at different locations. *Food Chemistry*, 101(2), 643–651. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.01.054.
- Khondkar, D., Tester, R. F., Hudson, N., Karkalas, J., & Morrow, J. (2007). Rheological behaviour of uncross-linked and cross-linked gelatinised waxy maize starch with pectin gels. *Food Hydrocolloids*, 21(8), 1296–1301. doi: 10.1016/j.foodhyd.2006.10.008.
- Kong, X., Bao, J., & Corke, H. (2009). Physical properties of *Amaranthus* starch. *Food Chemistry*, 113(2), 371–376. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.06.028.
- Kong, X., Kasapis, S., Bertoft, E., & Corke, H. (2010). Rheological properties of starches from grain amaranth and their relationship to starch structure. *Starch / Stärke*, 62, 302 – 308. doi: 10.1002/star. 200900235.
- Kong, X., Zhu, P., Sui, Z., & Bao, J. (2015). Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations. *Food Chemistry*, 172, 433–440. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.09.085.
- Kreith, F. (1999). *Dimesional Analysis and Data*. In Fluid Mechanics. Taylor & Francis.
- Krueger, B. R., Knutson, C. A., Inglett, G. E., & Walker, C. E. (1987). A Differential Scanning Calorimetry Study on the Effect of Annealing on Gelatinization



- Behavior of Corn Starch. *Journal of Food Science*, 52(3), 715–718. doi:10.1111/j.1365-2621.1987.tb06709.x.
- Kyereme, M., Hale, S. A., & Farkas, B. E. (1999). Modeling the temperature effect on the flow Behavior of sweet potato puree. *Journal of Food Process Engineering*, 22(3), 235–247. doi:10.1111/j.1745-4530.1999.tb00483.x
- Lee, Y., & Chang, Y. H. (2015). Effects of Galactomannan Addition on Rheological, Pasting and Physical Properties of Water Chestnut Starch. *Journal of Texture Studies*, 46(1), 58–66. doi:10.1111/jtxs.12113.
- Li, D., & Zhu, F. (2017). Physicochemical properties of kiwifruit starch. *Food Chemistry*, 220, 129–136. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.192.
- Li, G., & Zhu, F. (2018). Rheological Properties in relation to molecular structure of quinoa starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 767-775. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.03.039.
- Li, G., Wang, S., & Zhu, F. (2016). Physicochemical properties of quinoa starch. *Carbohydrate Polymers*, 137, 328–338. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.10.064.
- Li, H., Prakash, S., Nicholson, T. M., Fitzgerald, M. A., & Gilbert, R. G. (2016). Instrumental measurement of cooked rice texture by dynamic rheological testing and its relation to the fine structure of rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 146, 253–263. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.03.045.
- Lindeboom, N., Chang, P., & Tyler, R. (2004). Analytical, Biochemical and Physicochemical Aspects of Starch Granule Size, with Emphasis on Small Granule Starches. *Starch/Starke*, 56, 89-99. doi: 10.1002/star.200300218.
- Mandala, I. (2012). *Viscoelastic properties of starch and non-starch thickeners in simple mixtures or model food. From theory to biological applications*. Rijeka, HR, INTECH.
- Mezger, T.G. (2006). *The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers* (2nd edition). Hannover, Germany. Vincentz Network.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) (2018). *Nota Técnica de Granos Andinos*. Lima, Perú.
- Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. D., & Glazer, J. (2012). Rheological properties of gelatinized chestnut starch dispersions: Effect of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 112(1-2), 94–99. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.03.021.
- Muller, H. (1973). *Introducción a la Reología de Alimentos*. Zaragoza, España. Editorial Acribia.



- Nakauma, M., Ishihara, S., Funami, T., & Nishinari, K. (2011). Swallowing profiles of food polysaccharide solutions with different flow behaviors. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1165–1173. doi: 10.1016/j.foodhyd.2010.11.003.
- National Research Council (1989). *Lost Crops of the Incas: Little-Known Plants of the Andes with Promise for Worldwide Cultivation*. Washington, DC. National Academy Press.
- Nazir, A., Asghar, A., & Aslam Maan, A. (2017). Food Gels: Gelling Process and New Applications. *Advances in Food Rheology and Its Applications*, 335–353. doi:10.1016/b978-0-08-100431-9.00013-9.
- Norma Técnica Peruana (NTP) 209.077:1974 (revisada el 2018). *Almidones y féculas. Determinación del tamaño de partícula*. 1ra Edición. Dirección de Normalización – INACAL. Lima, Perú.
- Norton, I. T., Spyropoulos, F., & Cox, P. (2010). Dairy Systems. In *Practical Food Rheology: An Interpretive Approach*. Wiley-Blackwell. doi:10.1002/9781444391060
- Oladebeye, A. O., Oshodi, A. A., Oladebeye, A. A., 2009. Physicochemical properties of starches of sweet potato (*Ipomea batata*) and red cocoyam (*Colocasia esculenta*) cormels. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(4), 313-315. doi: 10.3923/pjn.2009.313.315.
- Ospina, K. G. (2016). *Estudio de la interacción de hidrocoloides empleados en alimentos y su efecto en las propiedades reológicas y de textura sensorial e instrumental*. Tesis para optar el título de Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia.
- Peñaranda, O. I., Perilla, J. E., & Algecira, N. A. (2008). *Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos*. Ingeniería e Investigación, 47–52.
- Peressini, D., Bravin, B., Lapasin, R., Rizzotti, C., & Sensidoni, A. (2003). Starch–methylcellulose based edible films: rheological properties of film-forming dispersions. *Journal of Food Engineering*, 59(1), 25–32. doi:10.1016/s0260-8774(02)00426-0.
- Perez – Rea, D., & Antezana – Gomez, R. (2018). The Functionality of Pseudocereal Starches. *Starch in Food*, 509 – 542. doi:10.1016/b978-0-08-100868-3.00012-3 L
- Pérez, S., & Bertoft, E. (2010). The molecular structures of Starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch/Stärke*, (62), 389–420. doi:10.1002/star.201000013
- Pérez-Pacheco, E., Moo-Huchin, V. M., Estrada-León, R. J., Ortiz-Fernández, A., May-Hernández, L. H., Ríos-Soberanis, C. R., & Betancur-Ancona, D. (2014). Isolation



- and characterization of starch obtained from *Brosimum alicastrum* Swartz Seeds. *Carbohydrate Polymers*, 101, 920–927. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.10.012
- Perez-Rea, D. (2014). The Challenges of Analyzing the Molecular Properties of Starch (Doctoral thesis). Lund University.
- Peris-Tortajada, M. (2004). Measuring starch in food. *Starch in Food*, 185–207. doi:10.1533/9781855739093.1.185.
- Perry, R.H., & Chilton, C.H. (1982). *Manual del ingeniero químico*. Editorial McGraw-Hill. México.
- Picout, D. R., & Ross-Murphy, S. B. (2003). Rheology of Biopolymer Solutions and Gels. *The Scientific World JOURNAL*, 3, 105–121. doi:10.1100/tsw.2003.15.
- Radosavljevic, M., Jane, J., & Johnson, L. A. (1998). Isolation of Amaranth Starch by Diluted Alkaline-Protease Treatment. *Cereal Chemistry Journal*, 75(2), 212–216. doi:10.1094/cchem.1998.75.2.212.
- Rao, M. A. (1999). *Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications*. Gaithersburg. Aspen Publishers.
- Rao, M.A. (1975). Measurements of flow properties of food suspensions with a mixer. *Journal of Texture Studies*, 6(4), 533-539. doi:10.1111/j.1745-4603.1975.tb01426.x
- Rao, M.A. & Rizvi, S.S.H. (1986). *Engineering properties of foods*. New York. Ed. Marcel Dekker.
- Rao, M.A. (1977). Measurement of flow properties of fluid foods. Developments, limitations, and interpretation of phenomena. *Journal of Texture Studies*, 8 (3), 257-282. doi: 10.1111/j.1745-4603.1977.tb01181.x
- Rasper, V. (1971). Investigations on starches from major starch crops grown in Ghana: III. —Particle size and particle size distribution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 22(11), 572–580. doi: 10.1002/jsfa.2740221105.
- Repo – Carrasco, R., Cortez, G., Onofre, R., Quispe, L., & Ramos, I. (2007). *De tales Harinas, Tales Panes*. Córdoba, Argentina. Baez Ediciones.
- Repo-Carrasco, R., Acevedo de La Cruz, A., Icochea, J. C., & Kallio, H. (2009). Chemical and Functional Characterization of Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) Grain, Extrudate and Bran. *Plant Foods for Human Nutrition*, 64(2), 94–101. doi:10.1007/s11130-009-0109-0.
- Rha, C. (1978). Rheology of fluid foods. *Food Technology*, 32(7), 77-82.



- Richter, S. (2007). Recent Gelation Studies on Irreversible and Reversible Systems with Dynamic Light Scattering and Rheology - A Concise Summary. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 208(14), 1495–1502. doi:10.1002/macp.200700285.
- Robles, M. (2012). Relación entre algunas propiedades fisicoquímicas y térmicas de gelatinización y retrogradación en almidón de papa nativa de Chiloé. Escuela de Ingeniería en Alimentos, Universidad Austral de Chile. Valdivia - Chile.
- Rojas, W., Soto, J. L., Pinto, M., Jager, M., & Padulosi, S. (2010). *Granos Andinos. Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañahua y amaranto en Bolivia*. Biodiversity International. Roma, Italia.
- Sahai, D., Buendia, M.O., & Jackson, D. S. (2001). Analytical Techniques for Understanding Nixtamalized Corn Flour: Particle Size and Functionality Relationships in Masa Flour Sample. *Cereal Chemistry*, 78, 14 – 18. doi: 10.1094/CCHEM.2001.78.1.14.
- Sasaki, T., Yasui, T., & Matsuki, J. (2000). Effect of Amylose Content on Gelatinization, Retrogradation, and Pasting Properties of Starches from Waxy and Nonwaxy Wheat and Their F1 Seeds. *Cereal Chemistry Journal*, 77(1), 58–63. doi:10.1094/cchem.2000.77.1.58.
- Scaldo, A.M., Cickerson, R.W., Peeler, J.T., & Read, R.B. (1970). The viscosity of egg and egg products. *Food Technology*, 24, 1301-1307.
- Schirmer, M., Höchstötter, A., Jekle, M., Arendt, E., & Becker, T. (2013). Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio. *Food Hydrocolloids*, 32, 52-63. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.11.032.
- Schirmer, M., Jekle, M., & Becker, T. (2015). Starch gelatinization and its complexity for analysis. *Starch/Stärke*, (67), 30-41. doi: 10.1002/star.201400071
- Seo, C.-W., & Yoo, B. (2012). Steady and Dynamic Shear Rheological Properties of Gum-Based Food Thickeners Used for Diet Modification of Patients with Dysphagia: Effect of Concentration. *Dysphagia*, 28(2), 205–211. doi:10.1007/s00455-012-9433-x.
- Sharma, S.K., Mulvaney, S.J., & Rizvi, S.S.H. (2000). *Food processing engineering: theory and laboratory experiments*. United States of America: Wiley-Interscience.
- Sherman, P. (1970). *Industrial Rheology*. New York. Academic Press.
- Singh, H., Lin, J.-H., Huang, W.-H., & Chang, Y.-H. (2012). Influence of amylopectin structure on rheological and retrogradation properties of waxy rice starches. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 367–373. doi: 10.1016/j.jcs.2012.04.007.



- Singh, J., & Kaur, L. (2009). Advances in potato chemistry and technology. *Academic Press*. doi: 10.1016/B978-0-12-374349-7.X0001-3
- Singh, N., Kaur, S., Kaur, A., Isono, N., Ichihashi, Y., Noda, T., & Rana, J.C. (2014). Structural, thermal, and rheological properties of *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* starches. *Starch/Starke*, 66, 457-467. doi: 10.1002/star.201300157.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh Sodhi, N., & Singh Gill, B. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219–231. doi:10.1016/s0308-8146(02)00416-8.
- Sjöö, M., & Nilsson, L. (2018). *Starch in Food: Structure, Function and Applications* (2nd Edition). Woodhead Publishing.
- Slattery, C. J., Kavakli, I. H., & Okita, T. W. (2000). Engineering starch for increased quantity and quality. *Trends in Plant Science*, 5(7), 291–298. doi: 10.1016/s1360-1385(00)01657-5.
- Solomon, M. J., & Spicer, P. T. (2010). Microstructural regimes of colloidal rod suspensions, gels, and glasses. *Soft Matter*, 6(7), 1391. doi:10.1039/b918281k.
- Stading, M., Langton, M., & Hermansson, A.-M. (1992). Inhomogeneous fine-stranded β -lactoglobulin gels. *Food Hydrocolloids*, 6(5), 455–470. doi:10.1016/s0268-005x(09)80031-3.
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering* (2nd Ed). East Lansing, Michigan State, USA. Freeman Press.
- Steffe, J.F., Mohamed, I.O., & Ford, E.W. (1986). Rheological properties of fluid food. Data compilation. *Physical and chemical properties of food*. Okus, M.R. (Ed.), ASAE Publication.
- Steffolani, M. E., León, A. E., & Pérez, G. T. (2013). Study of the physicochemical and functional characterization of quinoa and kañiwa starches. *Starch/Starke*, (00), 1 – 8. doi: 10.1002/star. 201200286.
- Tapia, M., & Fries, A. M. (2007). *Guia de campo de los Cultivos Andinos*. FAO y ANPE. Lima, Perú.
- Tapia, M., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo A., Mujica, A., Ortiz, R., Otazu, V., Rea, J., Salas, B., & Zanabria, E. (1979). *La Quinoa y la Kañiwa, Cultivos andinos*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo (CIID). Bogotá, Colombia.



- Tsai, M.-L., Li, C.-F., & Lii, C.-Y. (1997). Effects of Granular Structures on the Pasting Behaviors of Starches. *Cereal Chemistry Journal*, 74(6), 750–757. doi:10.1094/cchem.1997.74.6.750.
- Vaclavick, V. 2002. *Fundamentos de ciencia de los alimentos*. Zaragoza, España. Editorial Acribia.
- Waigh, T. A., Gidley, M. J., Komanshek, B. U., & Donald, A. M. (2000). The phase transformations in starch during gelatinisation: a liquid crystalline approach. *Carbohydrate Research*, 328(2), 165–176. doi:10.1016/s0008-6215(00)00098-7
- Wani, A. A., Singh, P., Shah, M. A., Schweiggert-Weisz, U., Gul, K., & Wani, I. A. (2012). Rice Starch Diversity: Effects on Structural, Morphological, Thermal, and Physicochemical Properties-A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11(5), 417–436. doi: 10.1111/j.1541-4337.2012. 00193.x.
- Waterschoot, J., Gomand, S., Fierens, E., & Delcour, J. (2015). Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. *Starch-Stärke*, 67(1-2), 14-29. doi: 10.1002/star.201300238
- Wazer, J.R., Lyons, J.W., Kim, K.Y., & Colwell, R.D. (1963). *Viscosity and flow measurements*. A Laboratory Handbook of Rheology. Interscience Publishers, New York.
- Welti-Chanes, J., & Aguilera, J. M. (2002). Engineering and Food for the 21st Century. In *Engineering and Food for the 21st Century*. CRC Press.
- Wu, Y., Ding, W., Jia, L., & He, Q. (2015). The rheological properties of tara gum (*Caesalpinia spinosa*). *Food Chemistry*, 168, 366–371. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.07.083.
- Yuan, Y., Zhang, L., Dai, Y., & Yu, J. (2007). Physicochemical properties of starch obtained from *Dioscorea nipponica* Makino comparison with other tuber starches. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 436–442. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.02.055.
- Zhang, B., Zhao, Y., Li, X., Zhang, P., Li, L., Xie, F., & Chen, L. (2014). Effects of amylose and phosphate monoester on aggregation structures of heat-moisture treated potato starches. *Carbohydrate Polymers*, (103), 228-233. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.12.055
- Zhu, F., & Wang, Y.-J. (2012). Rheological and thermal properties of rice starch and rutin mixtures. *Food Research International*, 49(2), 757–762. doi: 10.1016/j.foodres.2012.09.031.
- Zhu, F., Bertoft, E., & Li, G. (2016). Morphological, Thermal, and Rheological Properties of Starches from Maize Mutants Deficient in Starch Synthase III. *Journal of*



Agricultural and Food Chemistry, 64(34), 6539–6545. doi:
10.1021/acs.jafc.6b01265.

Zhu, L., Sun, N., Papadopoulos, K., & De Kee, D. (2001). A slotted plate device for measuring static yield stress. *Journal of Rheology*, 45(5), 1105–1122. doi:10.1122/1.1392299.

Zhuang, H., Feng, T., & BeMiller, J. N. (2019). Effects of hydrocolloids on normal maize starch and its distarch phosphates. *Food Hydrocolloids*, 96, 231–245. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.04.035.

Zimeri, J. E., & Kokini, J. L. (2003). Rheological properties of inulin–waxy maize starch systems. *Carbohydrate Polymers*, 52(1), 67–85. doi:10.1016/s0144-8617(02)00268-0.

ANEXOS

ANEXO A: Centrifugado para la extracción de almidón de cañihua

ANEXO A.1: 1ra centrifugación para la extracción de almidón de cañihua



ANEXO A.2: 4ta centrifugación para la extracción de almidón de cañihua



ANEXO B: Almidones extraídos de tres variedades de cañihua (Cupi, Illpa Inia y Ramis).



ANEXO C: DTP mediante el uso del equipo de tamices Ro – TAP



ANEXO D: Almidones gelatinizados de tres variedades de cañihua (Cupi, Illpa Inia y Ramis)



ANEXO E: Análisis reológico de almidón de Cañihua

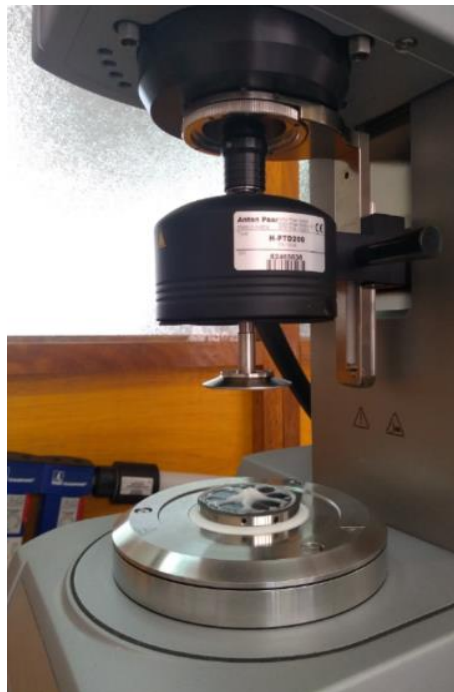
ANEXO E.1: Reómetro Modular Compacto Anton Paar



ANEXO E.2: Carga de gel de almidón de cañihua en el plato inferior del Reómetro



ANEXO E.3: Finalización del análisis reológico.





ANEXO F: Certificado de análisis de amilosa y amilopectina



PERÚ Ministerio de Agricultura y Riego



CERTIFICADO DE ANALISIS

SOLICITANTE : Erika Amella Sayra Churata.
DIRECCION :
PROCEDENCIA : Puno.
PRODUCTO : Almidón de Cañihua (Variedades Cupi, Ramis, Illpa INIA).
TIPO DE ANALISIS : Amilosa y amilopectina.
N° DE ANALISIS : 03.
FECHA DE RECEPCIÓN : 04 de Febrero del 2020.
FECHA DE CERTIFICACIÓN : 19 de Febrero del 2020.

Determinaciones	Cupi	Cupi	Cupi	Ramis	Ramis	Ramis	Illpa INIA	Illpa INIA	Illpa INIA
Amilosa %	13.91	13.97	14.70	12.93	12.00	14.03	13.78	12.92	12.97
Amilopectina %	86.09	86.03	85.30	87.07	88.00	85.97	86.22	87.08	87.03

Normas ó Métodos de ensayo utilizados en el Laboratorio:

Determinación de amilosa y amilopectina con Hidróxido de Sodio 1 N Lectura en Espectrofotómetro a 620 nm Técnica usada (ISO 1987).

Conclusiones:

La muestra analizada de Almidón de Cañihua CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).



INIA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Ing° JORGE CAÑIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Los resultados son aplicables a esta muestra.

La Rinconada Salcedo S/N°-Puno
T: (051) 363 812
www.inia.gob.pe
www.minagri.gob.pe

EL PERÚ PRIMERO