

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MARACAY EDO. ARAGUA

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN
DEL TIEMPO DE REACCIÓN DE UN ALMIDÓN MODIFICADO
QUÍMICAMENTE

Autor: Mairett Yuri Rodríguez Balza
Tutor Académico: Prof. Ezequiel A. Vierma H.
Tutor Industrial: Lic. Gabriel Betancourt

Maracay, Febrero del 2002

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA DE AGRONOMIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA
MARACAY EDO. ARAGUA

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN
DEL TIEMPO DE REACCIÓN DE UN ALMIDÓN MODIFICADO
QUÍMICAMENTE

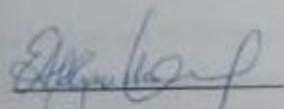
Trabajo presentado como parte de los requisitos
para optar al título de Ingeniero Agrónomo
Mención Agroindustrial
que otorga la Universidad Central de Venezuela

Mairett Yuri Rodríguez Balza

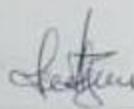
Maracay, febrero de 2002

APROBACIÓN DEL JURADO

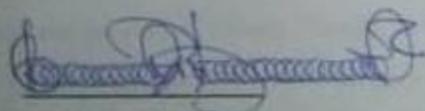
Nosotros los abajo firmantes, miembros del jurado examinador del trabajo especial de grado titulado: **APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE REACCIÓN DE UN ALMIDÓN MODIFICADO QUÍMICAMENTE**, cuya autora es la bachiller Mairett Yuri Rodríguez Balza, C.I. 13.542.025, certificamos que lo hemos leído y que en nuestra opinión reúne las condiciones necesarias de adecuada presentación y es enteramente satisfactorio en alcance y calidad como Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo Mención Agroindustrial.



Prof. Ezequiel A. Vierma H.
Tutor - Coordinador



Prof. Lucía G. de Fariñas
Jurado Principal



Lic. Gabriel Betancourt
Jurado Principal

Prof. Petra B. Navas
Jurado Suplente

DEDICATORIA

A mi adorada madre, por su apoyo no sólo económico sino moral y sentimental, durante mi vida, especialmente en mi carrera y tesis. Eres la mejor madre y sé que cada día aprendes a ser mejor y quiero que lo sigas haciendo por mis hermanitas que te necesitan más que yo. Este logro en mi vida es también por ti y para ti, espero darte muchos más. Te amo.

A mi hermosísima y adorada abuela Francisca por ser la persona que le dio la vida a mi madre por lo que hizo posible la mía. Además por su apoyo, cariño y confianza en todo momento. Que dios te dé mucha salud y puedas ver cumplir muchas más de las metas que tu nieta (casi hija) se ha trazado. Eres la abuela más bella que se puede tener. Te amo.

A mis bellas hermanitas que siempre me han visto como ejemplo e inspiración y por el apoyo que a pesar de su corta edad me han sabido ofrecer de la mejor manera. Que dios las bendiga, les dé mucha salud e inteligencia. Siempre estaré allí para ustedes.

A la persona más bella que se cruzó en mi camino desde que comencé mi carrera hasta que culminé mi tesis y espero estemos juntos durante el resto de nuestras vidas. Dios quiera que cada día nos adoremos y comprendamos más y que todos nuestros sueños se hagan realidad. Espero que estés a mi lado no sólo en los buenos sino también en los malos momentos al igual que deseo hacerlo yo. Que dios nos de fuerzas para seguir afrontando las tempestades que se avecinan en es mundo tan hermoso como duro. Te adoro.

A mis tíos Aliden, Héctor, Hernán, Zulia, Geobany y Danny; primos Lenis, Reimy, Mary, Carol, Deisy, Gerardo y a los más pequeños por su apoyo, confianza y palabras de aliento en los momentos más difíciles. Los quiero mucho.

A mi linda bisabuelita quien a pesar de su avanzada edad siempre me recuerda con gran cariño y ternura. Que dios te bendiga y te dé mucha salud.

A mis hermosos suegros José y Zully de Rodríguez por la confianza, aceptación y cariño brindado en todo momento.

A mis bellos cuñados Miguelangel y Victor Rodríguez, porque a pesar de su timidez se que han aprendido a quererme tanto como yo a ellos.

A toda la familia de Javier tanto González como Rodríguez, especialmente a la abuelita Carmen, la abuela Modesta, la tía Nena, la tía Gladis, tío Orlando, tío Omar, tío Rafael, Alexis, Mayra, Adriana, Rafael, Neyda, Miguel Javier, Manuel. Por ser una familia tan linda y unida como la mía. Por todos los momentos compartidos y el aprecio que me han brindado. Que dios les de salud y dicha.

A mis abuelos en el cielo, a mi prima Geobana y a Newman que se que de allí me han cuidado y ayudado y que lo seguirán haciendo. Siempre los llevaré en mi corazón. Que en paz descansen.

A mi padre, se que me quieres a tu manera. Te demostré que era capaz de lograrlo. A pesar de todo te quiero.

Mairrett Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios bendito y a la Virgen María porque me han guiado para la obtención de algo tan preciado como lo es mi título de Ingeniera.

A mi Ángel de la Guarda, que en todo momento me ha protegido y a los míos.

A mis padres por darme la vida, especialmente a mi madre y hermanas por su apoyo en todo momento.

A José Javier Rodríguez G. por su amor, compañía, apoyo, confianza, ayuda y comprensión, durante toda mi carrera, crecimiento personal y en la realización de mi trabajo especial de grado. Gracias mi vida.

A la Prof. Ranata de Bustamante por hacer realidad mi sueño de efectuar mis pasantías en una empresa de tal prestigio.

Al Ingeniero Lizardo Bustamante por permitirme llevar a cabo la Investigación en esta empresa.

A la Empresa Alfonso Rivas y Cia. ; especialmente a: Ing. Carlos Morales, Javier Osorios, Oscar Paolini y todo el personal de MOLINARCA que me apoyaron en mi corta permanencia en dicha planta; de INDELMA a: José Cisneros, Maribel Trillo, Josefina Betancourt, Lourdes Vizcaíno, Magali Cárdenas, Jacqueline (laboratorio), Mariana Martínez, Ledys (recepción), Francisco Martínez y a todo el personal obrero que labora en la Planta de Almidones Modificados y en general a todas las personas que en algún momento colaboraron para la realización de mis experimentos.

A José Angel Reyes por brindarme su amistad, apoyo y comprensión.

A la Msc. Isis Vivas por su valiosísima colaboración en la realización de la investigación de inicio a fin; además de su gran apoyo sin interés alguno y disponible para mí en todo momento. Se que cada día será una mejor profesional y persona. No cambie.

Al Prof. Alejandro Vierma por su tutoría y confianza en mí.

A la Prof. Lucía de Fariñas por sus sabios consejos y contribución en el desarrollo de la presente investigación.

Al Lic. Gabriel Betancourt por su comprensión y colaboración en todo lo que a su alcance estuvo durante los ensayos y la redacción del manuscrito. Gracias

Al Msc. Wilfre Machado por su gran colaboración en lo referente a los Diseños Estadísticos empleados y apoyo durante la realización de la Investigación.

A la Prof. Rosana Figueroa por incentivar me para iniciar como preparadora en la cátedra de estadística.

A todos los profesores de la cátedra de estadística: Judith García, Jorge Flores y Luis Pérez, por la ayuda ofrecida. Se que si hubiese acudido a ellos me hubiesen ayudado, en lo que estuviese a sus alcance.

A la Dra. Marisela Ascanio por su ayuda en lo referente a información bibliográfica.

A la máxima casa de estudios la Universidad Central de Venezuela - facultad de Agronomía, en la cual me he formado no sólo personal sino intelectualmente y espero seguir haciéndolo. Además con el favor de Dios pertenecer en un futuro a su personal docente.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido	pág.
Página de título.....	i
Aprobación del jurado.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	v
Tabla de Contenido.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Cuadros.....	xii
Resumen.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Almidón.....	4
3.1.1 Fracción del almidón.....	4
3.1.2 Temperatura de gelatinización e hinchamiento.....	5
3.1.3 Caract. y usos del almidón de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	9
3.1.4 Modificación del almidón.....	9
3.2 Herramientas Estadísticas.....	20
3.2.1 Control Estadístico.....	20
3.2.2 Técnicas Estadísticas.....	22
3.2.2.1 Diagrama de Flujo.....	22
3.2.2.2 Gráficos de Control.....	24
3.2.2.3 Histogramas.....	28
3.2.2.4 Diagrama de Dispersión.....	28
3.2.2.5 Diseño de la prueba.....	30
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
4.1 Desarrollo del ensayo.....	35
4.2 Materiales y equipos empleados en los ensayos de laboratorio.....	35

Contenido	pág.
4.2.1 Ensayo preliminar.....	35
4.2.2 Ensayo final.....	35
4.3 Herramientas y procedimientos empleados para analizar la información recolectada con data histórica y ensayos.....	35
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
5.1 Diagrama de flujo del ensayo.....	39
5.2 Herramientas Estadísticas.....	42
5.2.1 Aplicación de gráficas de control, histogramas y diagramas de dispersión a la data histórica.....	42
5.2.2 Ensayo preliminar.....	67
5.2.3 Ensayo final.....	68
VI. CONCLUSIONES.....	73
VII. RECOMENDACIONES.....	75
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
IX. ANEXOS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figuras	pág.
1. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de un almidón de yuca (<i>Manihot esculenta</i>) modificado químicamente (entrecruzado).....	19
2. Símbolos usados en diagramas de flujos.....	23
3. Diagrama de flujo del proceso de obtención de un almidón de yuca (<i>Manihot esculenta</i>) modificado químicamente a nivel piloto hasta su neutralización.....	41
4. Gráficas de control de pH del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	42
5. Gráficas de control (límites recalculados) del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	43
6. Histograma de pH del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	44
7. Histograma (recalculado) de pH del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	45
8. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del almidón regular vs pH del almidón regular de yuca 6. Histograma (recalculado) de pH del almidón regular yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	46
9. Diagrama de dispersión del tiempo de reacción (h) vs pH del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	46
10. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del proceso vs pH del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	47
11. Gráficas de control de viscosidad (U.B) del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	47
12. Histograma de viscosidad (U.B) del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	48
13. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del almidón regular vs temperatura de gelificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	49

Figuras	pág.
14. Gráficas de control de temp. de gel. (°C) del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	50
15. Histograma de temperatura de gel. (°C) del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	51
16. Gráficas de control de la viscosidad (U.B) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	52
17. Histograma de viscosidad (U.B) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	53
18. Gráficas de control del tiempo de reacción (h) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	53
19. Histograma del tiempo de reacción (h) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	54
20. Diagrama de dispersión del tiempo de reacción(h) vs viscosidad (U.B) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	55
21. Gráficas de control de pH para la reacción de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	56
22. Histograma de pH para la reacción de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	56
23. Diagrama de dispersión del tiempo de reacción (h) vs pH para la reacción de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	57
24. Gráficas de control de Kgss de la suspensión del almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	58
25. Histograma de Kgss de la suspensión del almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	58
26. Diagrama de dispersión del tiempo de reacción (h) vs Kgss de la suspensión del almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	59

Figuras	pág.
27. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) vs Kgss de la suspensión del almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	59
28. Gráficas de control de catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	60
29. Histograma de catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	61
30. Diagrama de dispersión del tiempo de reacción (h) vs catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	61
31. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del proceso vs catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	62
32. Gráficas de control de fosfato (Kg) utilizado en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	63
33. Histograma de fosfato (Kg) utilizado en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	64
34. Diagrama de dispersión del tiempo de reacción (h) vs fosfato (Kg) utilizado en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	64
35. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del proceso vs fosfato (Kg) utilizado en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	65
36. Gráficas de control de °Be de la suspensión utilizada en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	66
37. Histograma de °Be de la suspensión utilizada en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	66

Figuras

	pág.
38. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del proceso vs °Be de la suspensión utilizada en el proceso de modificación de almidón regular de yuca (Manihot esculenta).....	67
39. Grafico de medias de Duncan para el tiempo de reacción obtenido con los niveles del factor A (viscosidad) y D (pH reacción)	71
40. Grafico de medias de Duncan para la Viscosidad obtenida con los niveles del factor B (catalizador).....	72

LISTA DE CUADROS

Cuadros	pág.
1. Análisis de varianza para la variable viscosidad del proceso obtenido del ensayo preliminar.....	68
2. Análisis de varianza obtenido del diseño factorial fraccionado.....	69
3. Prueba de rango múltiple de Duncan para el tiempo de reacción (h).....	70
4. Prueba de rango múltiple de Duncan para la viscosidad (UB).....	71

RESUMEN

En la obtención del almidón modificado químicamente en una industria manufacturera; el tiempo de reacción es una de las variables con mayor variación (3 a 8 horas). Con la consecuente pérdida de tiempo e insumos. Se evaluaron a escala piloto las causas que influían en el tiempo de reacción y la viscosidad. Inicialmente se describió el procedimiento a nivel piloto para la modificación química de un almidón de yuca (*Manihot esculenta*) hasta su neutralización. Seguidamente se aplicaron herramientas estadísticas como gráficas de control, histogramas y diagramas de dispersión a la data histórica tanto de características de calidad de la materia prima (almidón de yuca), como también a las variables del proceso, observándose que tanto las características de calidad como las variables evaluadas se encontraron fuera de control estadístico. La viscosidad del almidón regular de yuca (UB) vs la temperatura de gelatinización (°C) y el tiempo de reacción (h) vs el pH para la reacción presentaron una débil asociación lineal positiva y la viscosidad del proceso (UB) se asocia lineal y negativamente con el catalizador (Kg). Luego se diseñó un ensayo preliminar para evaluar el pH del almidón regular de yuca a 3 niveles y la disolución del almidón a 2 niveles, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ni en su interacción, con un CV considerado bajo (5.98 %). Por último se realizó un ensayo empleando un diseño factorial fraccionario 3^{k-1} los factores a tres niveles: viscosidad del almidón regular de yuca (UB), catalizador (Kg), fósforo (Kg) y pH para la reacción, se evaluaron; la viscosidad del almidón regular de yuca y el pH para la reacción resultó altamente significativa sobre el tiempo de reacción, pero el CV (33,89 %) fue alto; en la viscosidad sólo el catalizador influyó significativamente, con un CV bajo (2,05 %). La prueba de medias de Duncan mostró que para el tiempo de reacción, el nivel alto y el intermedio de la viscosidad del almidón regular de yuca fueron los más adecuados, con un tiempo de reacción de 1,84 y 1,46 h respectivamente, en cuanto al pH el nivel más bajo fue el adecuado para obtener un tiempo de reacción de 1,82 h y para la viscosidad se puede emplear cualquiera de los 3 niveles oscilando se valor entre 470 y 485 UB.

Palabras claves: almidón modificado/ herramientas estadísticas/ control estadístico/ capacidad de proceso/ diseño factorial fraccionado.

I. INTRODUCCIÓN

Como hidrato de carbono el almidón se encuentra en especial abundancia en determinados tejidos vegetales, como los tubérculos y el endospermo de las semillas, el cual se presenta en forma de gránulos. Consta de dos tipos de polímeros de la glucosa: la amilosa y la amilopectina.

Además las raíces tuberosas de la yuca (*Manihot esculenta*), constituyen un valioso recurso de carbohidratos y energía; asimismo es un medio abundante y económico de almidón.

Los almidones modificados químicamente provenientes de la yuca (*Manihot esculenta*), tienen un gran uso en la industria alimenticia, farmacéutica, textilera, cartonera, entre otras.

En el proceso de elaboración del almidón modificado químicamente en la Industria Manufacturera a llevarse a cabo el estudio; el tiempo de reacción, es una de las variables que presenta mayor variación, oscilando entre 3 y 8 horas. Esto afecta la programación del proceso; si el tiempo es cercano al límite superior se pierde tiempo que pudiese invertirse en otro lote de fabricación, ya que habría que dejar reaccionar hasta que la viscosidad esté dentro del rango de especificaciones; por el contrario si es muy bajo el tiempo de reacción, se correría el riesgo de que la viscosidad sea menor de la permitida según el rango de especificaciones, obteniéndose un almidón con características no deseadas, generando pérdida tanto de productos, como de tiempo, en este caso se suele reprocesar mezclando con otro lote de fabricación nuevo.

La viscosidad y otras propiedades del almidón puede modificarse mediante procesos físicos o químicos, con la finalidad de aportarle propiedades especiales como resistencia a altas temperaturas, a condiciones ácidas, entre otras. La viscosidad juega un papel fundamental en este proceso, de allí que la reacción perdurará el tiempo necesario para que esta variable alcance el rango deseado (especificaciones)

En este trabajo se evaluarán los factores que influyan en el tiempo de reacción del proceso

de modificación de un almidón de yuca (*Manihot esculenta*); pero el número de factores que causan la dispersión en cualquier proceso industrial es teóricamente infinito. Debido a que sólo podemos controlar una pequeñísima fracción de éstos por medio de la tecnología, ineludiblemente habrá dispersión de las características de los productos de nuestros procesos (Pérez, 1999).

El uso de las Herramientas Estadísticas básicas, permitirá determinar las posibles causas de variación que influyen sobre el tiempo de reacción y la viscosidad con el fin de poder controlarlas. Adicionalmente, a través del Diseño estadístico se evaluarán distintas combinaciones de estas causas a fin de encontrar el mejor tratamiento o bien los mejores niveles de los factores (características de calidad de la materia prima o variables del proceso), para la obtención de un almidón con viscosidad dentro de especificaciones, en un tiempo de reacción adecuado.

II. OBJETIVOS

GENERAL: Evaluar a escala piloto (laboratorio) las causas que influyen sobre el tiempo de reacción y la viscosidad; en el proceso de fabricación de un almidón modificado químicamente.

ESPECÍFICOS:

- Describir a nivel piloto el procedimiento para la modificación de un almidón químicamente hasta su neutralización.
- Detectar algunas características de calidad de la materia prima y/o variables del proceso que puedan afectar la viscosidad y el tiempo de reacción en el proceso de obtención de un almidón modificado químicamente.
- Evaluar la relación entre las características de calidad de la materia prima y/o variables del proceso, detectadas como influyentes en el tiempo de reacción y la viscosidad en el proceso de obtención de un almidón modificado químicamente.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. ALMIDÓN

Es la mayor reserva de energía en casi todas las plantas; siendo muy abundante en semillas, raíces y tubérculos (Fennema, 1993).

Las moléculas de almidón son polímeros de los azúcares simples (o monosacáridos) de la glucosa (azúcar con 6 átomos de carbono en la molécula). Cuando las unidades de glucosa en una molécula exceden de un cierto número, el alto polímero resultante se denomina almidón (Charley, 1998).

De todos los polisacáridos, el almidón es el único producido universalmente en pequeños agregados individuales, denominados gránulos (Fennema, 1993). Los granos del almidón se encuentran en el interior de las células conjuntamente con la proteína, las grasas, los carbohidratos solubles, etc, y se obtienen por un proceso de extracción y purificación (Montaldo, 1979).

3.1.1. Fracciones del almidón

El almidón consta de dos tipos de polímeros de la glucosa: la amilosa y la amilopectina. La *amilosa* es esencialmente lineal, está formada por largas cadenas, donde todos los residuos de glucosa están unidos a través del enlace 1,4 como en la maltosa. La *amilopectina* es una molécula ramificada; dicha ramificación le da un efecto de arbusto a las moléculas de amilopectina y tiende a hacerlas menos dispersables en el agua (Charley,1998). Como con la amilosa, las uniones entre las moléculas de glucosa son enlaces glucosídicos α 1,4, pero alrededor del 4-5 % de las unidades de glucosa están implicadas también en enlaces α 1,6, generando puntos de ramificación (Coulte, 1998). Los almidones de distinta procedencia tienen características diferentes y distintivas en lo que a forma, tamaño, composición y cristalinidad se refiere. La base molecular de las

relaciones existentes entre ellas todavía no se conoce completamente (Belitz y Groch, 1997).

Tanto la amilosa como la amilopectina influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización (Badui, 1997).

La proporción de amilopectina en el grano de almidón es generalmente mayor a la de amilosa, sobre todo en los tubérculos. La yuca posee 17 : 83 (amilosa : amilopectina). Los almidones con mayor proporción de amilopectina forman soluciones de baja retrogradación con muy poca tendencia a formar geles irreversible, razón por la cual tiene efecto estabilizante, lo cual los hace apropiados para la elaboración de productos alimenticios. Aquellos alimentos con alto contenido de amilosa muestran una elevada viscosidad y son capaces de formar geles por lo cual son utilizados en la elaboración de películas y adhesivos (Interquell, 1971 citado por Monserrat, 1986).

La amilopectina por calentamiento en agua, proporciona soluciones claras y de alta viscosidad, que son además filamentosas y cohesivas. Al contrario que la amilosa, no tiene casi tendencia a la retrogradación, ni presenta envejecimiento, ni forma geles, aunque la concentración sea muy alta. La viscosidad decrece sin embargo fácilmente en medio ácido en tratamiento por autoclave o por fuerte agitación mecánica.

Los gránulos de almidón de las raíces son más cristalinos que los de los cereales. Un aspecto inesperado de la cristalinidad es que se debe más a la amilopectina ramificada que a la amilosa lineal (Coultate, 1998).

3.1.2. Temperatura de gelatinización e hinchamiento.

El almidón comercial está formado por granos de almidón en los que se ha retirado la mayor parte de la humedad. Al secarse el grano, las moléculas de almidón se agrupan más estrechamente y el grano se encoge. Cuando los granos de almidón no cocidos, ni

dañados se colocan en agua fría, absorben agua y se hinchan. Sin embargo, la cantidad de agua absorbida y el hinchamiento son limitados. El pequeño aumento de volumen que tiene lugar en el agua a temperatura ambiente es una verdadera hinchazón y es reversible. La cristalinidad y birrefringencia de los gránulos no cambian (Charley, 1998).

El calentamiento continuo en presencia de agua abundante resulta en la completa pérdida de cristalinidad, el cual puede apreciarse por la pérdida de la birrefringencia. En el momento que desaparece la birrefringencia se conoce como punto de gelatinización o *temperatura de gelatinización* (Fennema, 1993)

Cuando se incrementa la temperatura, las moléculas de almidón vibran vigorosamente rompiendo los enlaces intermoleculares y permitiendo así la formación de puentes de hidrógeno con el agua (Fennema, 1993). Pero la captación de agua de los granos de almidón comienza a una temperatura variable, de acuerdo con la fuente del almidón (Charley, 1998).

Cuando la energía cinética de las moléculas de agua en contacto con los granos de almidón, se hace lo suficientemente grande como para producir la atracción entre las moléculas de almidón unidas por puentes de hidrógeno dentro del gránulo, las moléculas de agua pueden penetrar al grano de almidón, primero en las áreas menos densas y luego que se eleva la temperatura, en las áreas cristalinas (Charley, 1998)

Los almidones en suspensiones acuosas sufren ciertos cambios en su estructura por el aumento de temperatura durante la cocción; el orden es el siguiente: hinchamiento y gelatinización del gránulo con aumento de la viscosidad; destrucción de los puentes de hidrógeno, disminuyendo la viscosidad hasta lograr una viscosidad constante; con el enfriamiento aparecen nuevamente los puentes de hidrógeno, con lo cual se forma el gel de alta consistencia (Harsceldt, 1978 citado por Monserrat, 1986).

Sobre la temperatura de gelatinización influyen muchos factores, entre los cuales están los siguientes: relación amilosa: amilopectina, pH de la pasta, origen botánico del almidón, contenido de sal y azúcar, etc.

Todos los granos de almidón de una sola fuente vegetal no se gelatinizan a la misma temperatura. Entre más grandes son los granos, tienden a hincharse a menores temperaturas (Charley, 1998).

En un ensayo donde se sembraron cuatro genotipos de yuca (mandioca) en sequía e invierno, cosechados en diferentes tiempos después de sembrados; se obtuvieron almidones que variaban en cuanto a su temperatura de gelatinización y exhibían un máximo de viscosidad variable dependiendo de la estación en la cual fue sembrado y el tiempo hasta la cosecha (Defloor y col., 1998).

La *viscosidad*, es un término utilizado para indicar la resistencia que presentan los líquidos al esfuerzo mecánico, la agitación o el flujo (Krüll, 2001).

En un estudio de la viscosidad realizada a los almidones de tres variedades de yuca brasileras se obtuvo que ellas difieren fundamentalmente en este aspecto (Pacheco, citado por Montaldo, 1979).

La viscosidad depende de muchos factores entre los cuales están los siguientes: colisión y cizallamiento del grano, temperatura a la cual ocurre el incremento en la viscosidad, la concentración de la suspensión de almidón, el tamaño del gránulo, el cual está relacionado con el origen botánico del almidón, las fuerzas moleculares y el efecto de otros ingredientes presentes en el sistema (Leach, 1965; Osman, 1967 citados por Monserrat, 1986).

Entre los factores que afectan los geles de almidón se pueden mencionar:

- Tipo de almidón utilizado: ello se refiere a la relación amilosa : amilopectina,
- Proporción de almidón y agua en la mezcla inicial,

- Azúcar: si ésta se añade a la mezcla, la gelificación se modifica, ya que el azúcar compite por agua con el almidón. El resultado es un gel más suave, menos sólido, con jarabe unido en la cadena del almidón.
- pH: afecta la gelificación, tendiendo a formar una pasta más viscosa, que propiamente un gel. Esto se debe a la hidrólisis ácida del almidón en fragmentos de polisacáridos más pequeños.
- Grasa: su presencia modifica el proceso de gelificación. La grasa ayuda a controlar la gelificación de las moléculas de almidón, cubriendo los gránulos formados.
- Estabilidad: en reposo, los geles de almidón se contraen, debido a un enroscamiento parcial de las moléculas (retrogradación), cuando esto se presenta, se pierde agua del gel (sinéresis). Aunque los almidones de amilosa forman geles más rápidamente, éstos tienden a ser inestables, mientras que los geles altos en amilopectina son más estables. (Brownsell y col, 1993)

El volumen de agua en la pasta cocida es libre, encontrándose en los espacios formados por la red de gránulos de almidón hinchados y por la amilosa precipitada. Cuando se corta un gel o si se le deja envejecer, parte del líquido se moviliza desde los intersticios. Esta fuga del líquido de un gel se conoce con el nombre de **sinéresis** (Charley, 1998)

Si la suspensión acuosa de almidón se mantiene durante un tiempo a una temperatura inferior a la de gelatinización, proceso que se denomina temperado, se eleva la temperatura de gelatinización debido al parecer a la reorganización de la estructura del gránulo (Belitz y Grosch, 1997).

Cabe señalar que la **retrogradación** es la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y accionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidróxilos (Badui, 1997).

3.1.3. Características y usos del almidón de yuca

En cuanto a las *características de los almidones de yuca* se pueden mencionar: alcanzan el máximo de viscosidad a temperaturas menores que la de los almidones de cereales; la gelatinización es completa en la mayoría de los almidones a temperaturas inferiores de 95°C; los granos de almidón cocido son elásticos y fácilmente deformados; un líquido espesado con este almidón de yuca tienen aproximadamente el mismo poder espesante que el de maíz, sólo que el de yuca no se asienta (Charley, 1998). La temperatura de gelatinización del almidón de yuca, se encuentra en un rango de 58,5 - 70 °C; presentan un rápido incremento en la viscosidad durante la gelatinización, alta claridad en la suspensión, sabor insípido, gran textura cohesiva, baja tendencia de retrogradación y buena estabilidad del gel (Pardio y Waliszewski, 1994). Los almidones de yuca, maíz y papa pueden absorber 42,9 ; 39,9 y 50,9 g de agua por 100 g de almidón en base seca respectivamente. Los gránulos de almidón de yuca tienen forma semiesférica, un diámetro de 5-35 μm , 38% cristalinidad, temperatura de gelificación entre 52-64 °C. (Fennema, 1993).

El *almidón de yuca es ideal para usarlo* en sopas, salsas y productos lácteos, por su naturaleza en cuanto al sabor que es casi insípido. Además para el uso en la confitería y en alimentos para bebés, ya que provee textura y estabilidad manteniendo el balance nutricional (Hendrikx, 1999)

3.1.4. Modificación del almidón

Por muchos años la industria alimenticia usó los almidones nativos en un grado limitado, debido a las restricciones y problemas que se presentaban con las propiedades de esos almidones; tal como: el poco desarrollo del gel en los almidones con alto contenido de amilosa. Para expandir la utilidad de los almidones, la industria fue implementando una gran variedad de técnicas para modificar las características que gobiernan las propiedades de los almidones. Estas técnicas dieron origen a numerosos derivados de almidón, las

cuales durante las últimas décadas han sido factores de importancia en el campo de los alimentos (Wurzburg, 1970 citado por Rocioli, 1983).

El almidón de yuca nativo es inestable a la cocción y al manejo mecánico además no forma geles firmes, aunque tiene buena claridad de pasta (Rocioli, 1983).

Los almidones de maíz, patata, trigo y yuca, en forma nativa y modificada, constituían en 1980 el 99% de la producción mundial; la yuca en particular representaba un 8% de la producción (Belitz y Grosch, 1997).

Las propiedades del almidón y de sus fracciones (amilosa y amilopectina) pueden mejorarse o adaptarse a necesidades tecnológicas específicas por *modificaciones físicas o químicas* (Belitz y Grosch, 1997)

Con la modificación de los almidones se logra: una mayor viscosidad, mejor claridad y viscoelasticidad, se puede bajar la temperatura de gelatinización, se obtienen almidones que resisten condiciones de altas temperaturas y acidez. Todas estas propiedades hacen a los almidones modificados más deseables y aplicables en la industria de los alimentos, ya que pueden adaptarse a las condiciones de procesamiento y almacenamiento, dándole mejores características a los productos alimenticios (Rocioli, 1983).

En una prueba realizada con Novation 3300 (Almidón modificado de yuca), otros almidones nativos y modificados tradicionalmente como el Waxy maize; se encontró que el Novation exhibía gran estabilidad en la viscosidad y una resistencia superior del gel con respecto a los nativos y comparable con los de Waxy maize (MacDougall, 1999).

Entre los *tipos de modificaciones químicas* se pueden mencionar:

- Entrecruzamiento, el cual supone la reacción de los grupos hidroxilo con reactivos bi o polifuncionales;
- Hidrólisis ácida, para romper limitadamente pero al azar las moléculas de almidón. Se utilizan para la fabricación de caramelos (Wong, 1995).

- Oxidación, se efectúa con diferentes agentes químicos, pero el más empleado es el hipoclorito de sodio. Este tipo de almidones modificados son utilizados en la industria textil, de papel, de productos de lavandería de uso casero y en industria de confitería para la fabricación de bombones de gomas (Badui, 1997).

Pero existen otras *modificaciones*, como son las *físicas*: gelatinización, consiste en cocer y gelatinizar el almidón haciéndolo pasar por unos rodillos calientes, se seca; el producto se hincha rápidamente en agua fría y forma una pasta estable. Se utilizan en la elaboración y almacenamiento de productos instantáneos para panaderías y de confitería (Wong, 1995). La reacción del almidón con reactivos bi o polifuncionales, tales como metafosfato trisódico, oxiclórico de fósforo, epiclorhidrina o anhídridos mixtos de ácido acético y un ácido dicarboxílico como el adípico, produce compuestos de *almidones entrecruzados*: almidón: R-OH (Belitz y Grosch, 1997). Esta reacción es de esterificación (reaccionan con los OH⁻ y forman uniones éster) pero de dos cadenas unidas por un grupo funcional, como el éster fosfato, los cuales establecen enlaces intermoleculares que refuerzan el gránulo (Badui, 1997).

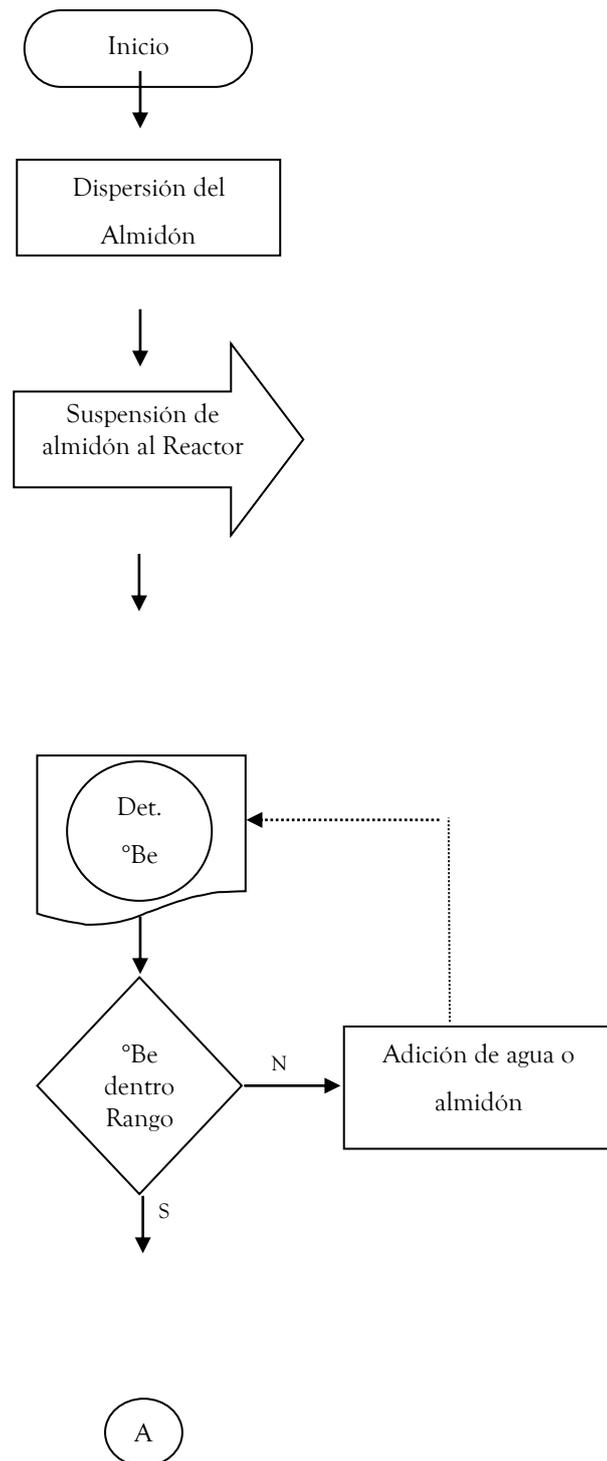
El entrecruzamiento puede ser producido haciendo reaccionar el almidón en suspensión acuosa con cloruro de fosforilo, o bien el almidón en seco con trimetafosfato. El cambio más notable debido al entrecruzamiento de grupos fosfatos es el incremento de la estabilidad del gránulo hinchado; según el grado de derivatización, la viscosidad de las soluciones calientes puede ser mayor o menor que la del almidón original. Los que poseen mayor grado de entrecruzamiento son muy estables a altas temperaturas, bajo pH y agitación mecánica. Si el almidón está suficientemente entrecruzado, puede llegar a inhibirse la gelatinización, incluso en agua hirviente (Fennema, 1993). Dependiendo del grado de entrecruzamiento conseguido se obtendrán productos de temperatura de gelatinización más o menos incrementada y de capacidad espesante más o menos disminuida; la estabilidad frente a la agitación y a los valores extremos de pH se incrementa (Belitz y Grosch, 1997)

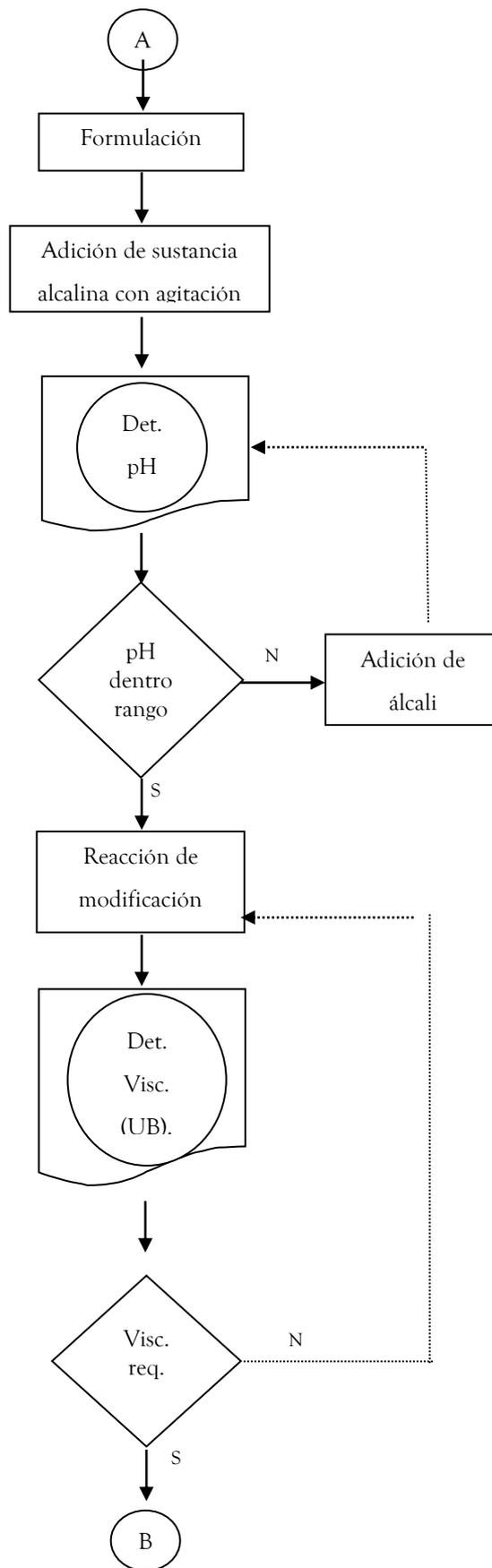
Los *almidones entrecruzados se utilizan* en todos aquellos productos en los que es necesaria una gran estabilidad (Belitz y Grosch, 1997); tales como, alimentos infantiles, salsas para ensaladas, rellenos de frutas para tartas y postres cremosos, en los que funcionan como espesantes y estabilizantes (Fennema, 1993). Además, las pastas de estos derivados presentan una alta estabilidad a la agitación y al calentamiento, incluso en medio ácido, por lo que se emplean en alimentos que requieren una esterilización, o que tienen un pH bajo, no retrogradan ni gelifican y su sinéresis es mínima (Badui, 1997).

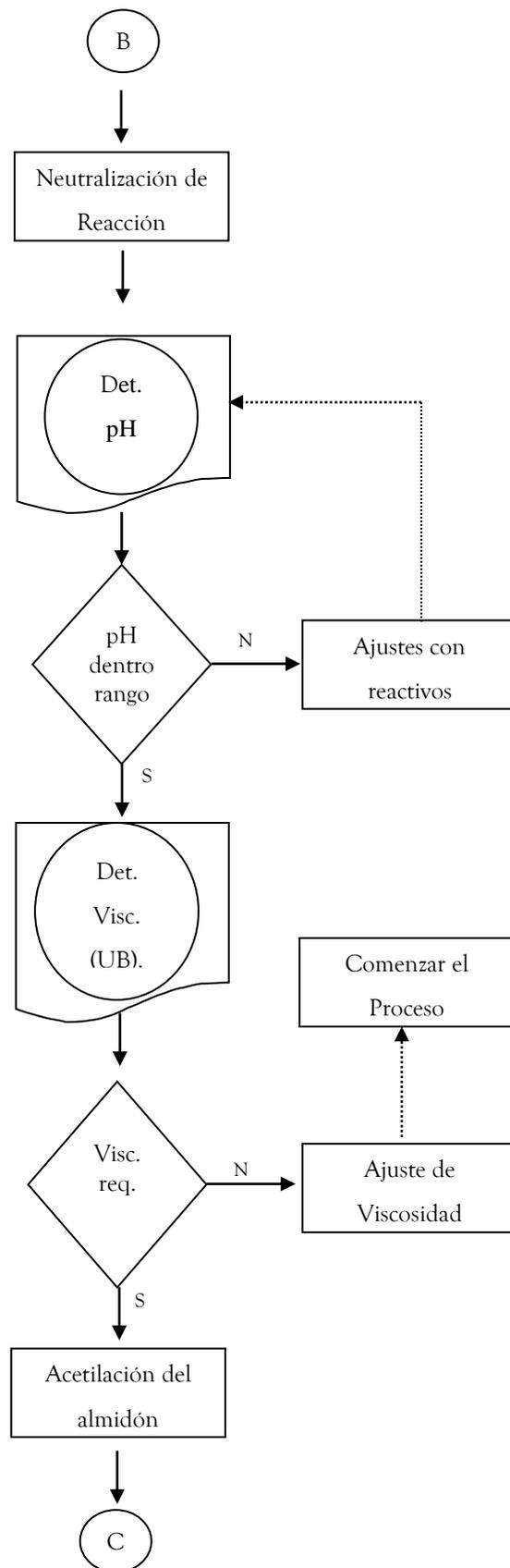
Descripción del proceso de fabricación de un almidón modificado químicamente (Entrecruzado - Acetilado)

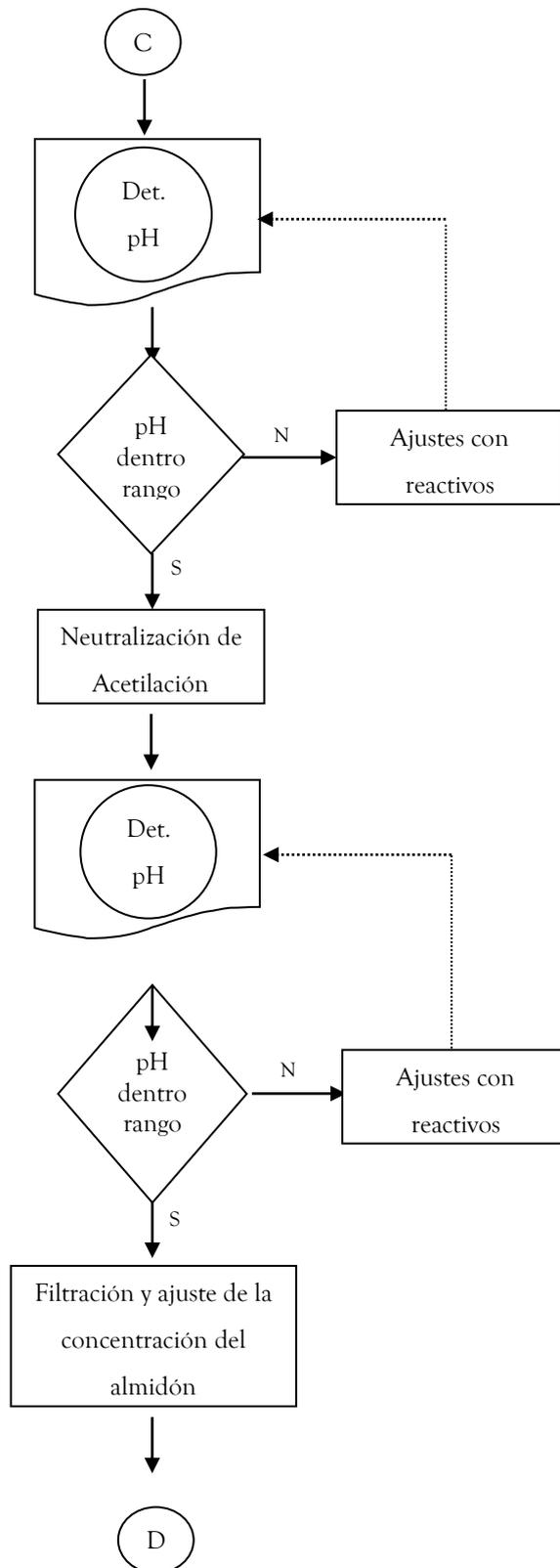
- Dispersión del almidón: En esta etapa, se lleva a cabo la disolución del almidón seco en agua; una vez disuelto se transfiere la suspensión al reactor de fabricación.
- Reactor de Fabricación: Es un tanque donde se realiza la reacción de modificación; en éste, a la suspensión que está siendo transferida, se le determina pH, °Bé y temperatura, de tal manera que si los °Bé no se encuentran dentro de los límites de especificación de proceso, se ajusten con la adición de agua o almidón; mientras se termina de bombear dicha suspensión.
- Formulación: Se obtiene la cantidad de reactivos a utilizar durante toda la fabricación, según los Kg de sustancia seca y mediante una fórmula de proceso. Tales como álcali, catalizador, reactivo bi o polifuncional, reactivo con un grupo acetilo, entre otros.
- Adición de reactivo para ajuste de pH: Para alcanzar un determinado pH alcalino, se adiciona una base y se determina el pH, ajustando hasta que éste se encuentre dentro del rango de especificación de proceso.
- Reacción de Modificación: Una vez alcanzado el pH esperado, se agrega el catalizador y luego de un tiempo determinado el reactivo bi o polifuncional (fosfato). Se evalúa el proceso, analizando la viscosidad cada hora, hasta que la misma esté en el rango de valor requerido.

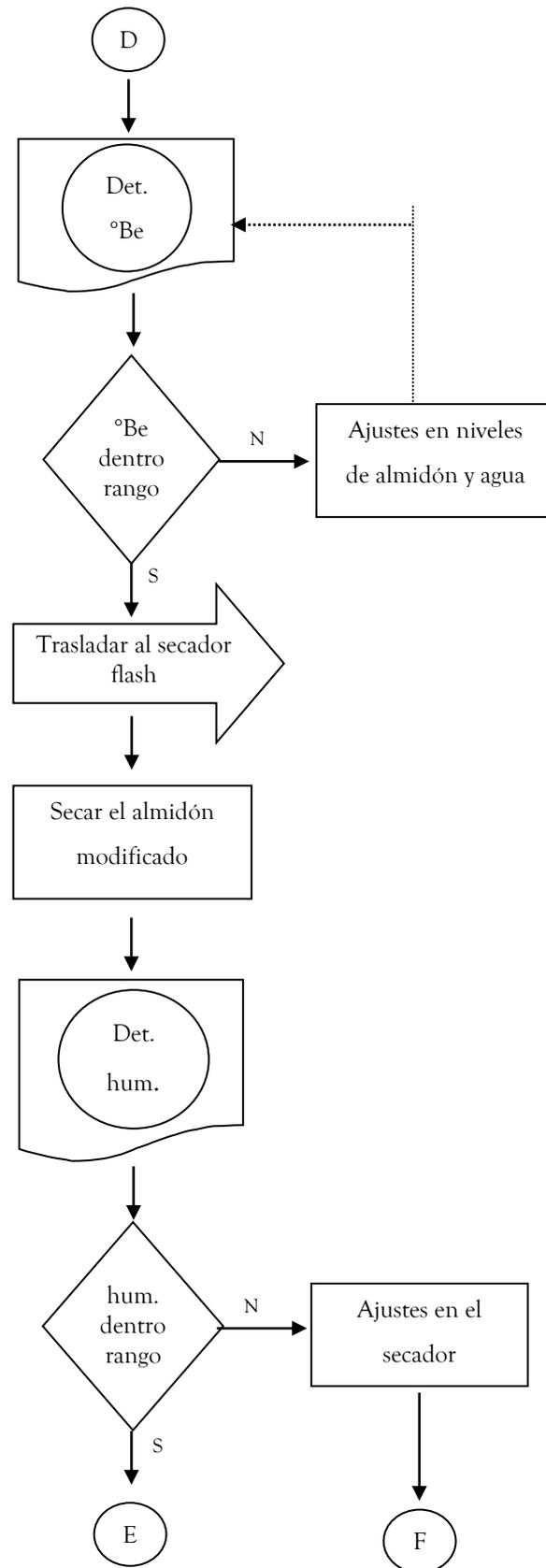
- Neutralización de Reacción: Esta etapa consiste en detener la reacción agregando ácido hasta obtener un pH, en el cual el fosfato no continúe reaccionando. Se mide continuamente el pH, si se halla fuera del rango de especificación, se ajusta con reactivos. Al encontrarse dentro del rango, se analiza la viscosidad para registrar el valor final de la misma. Si la viscosidad no es la requerida, se ajusta reprocesando con un lote nuevo y con una formulación diferente. Al obtener la viscosidad se procede a la acetilación.
- Acetilación: En esta etapa se eleva el pH hasta un rango alcalino determinado, adicionando un álcali. Se evalúa continuamente el pH, efectuando ajustes si es necesario. Luego se adiciona el reactivo para la acetilación (con grupo acetilo).
- Neutralización de Acetilación: Transcurrido el tiempo de Acetilación, se adiciona ácido hasta un rango de pH especificado. Si al determinar pH, este se encuentra fuera del rango se ajusta.
- Filtración y ajuste de la concentración del almidón: Se alimenta el tanque de lavado con el almidón y agua fresca, haciendo pasar el almidón por hidrociclones y filtrorrotativo; midiendo constantemente los °Bé y ajustando los niveles de almidón y agua si es necesario, hasta que esté dentro del rango de especificación.
- Secado del Producto: Se transfiere la lechada de almidón a los tanques de alimentación del secador flash. Se determina % humedad cada hora, si no está dentro del rango requerido se ajusta hasta secar el lote.
- Envasado: Se transfiere el almidón al área de envasado, se envasa en sacos y se paletiza.
- Almacenamiento: Se almacenan las paletas de almidón modificado, hasta su distribución. Esto se puede observar en la Figura 1, la cual fue realizada empleando la simbología presentada en la Figura 2











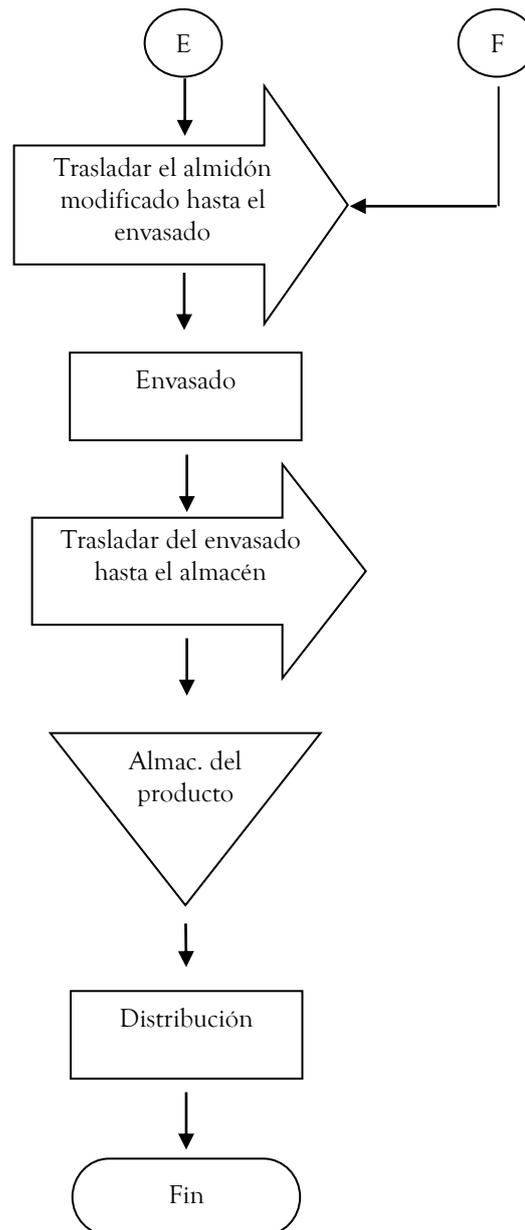


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de fabricación de un almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado químicamente (entrecruzado-acetilado).

3.2. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS

Ahora, antes de ingresar al tema de la herramientas estadísticas; es conveniente señalar que en la empresa, a fin de satisfacer sus necesidades y la de los clientes, se han dedicado a la *calidad*. La cual se puede definir, como el juicio que tienen los clientes o usuarios sobre un producto o servicio (Gitlow, 1991).

3.2.1. Control Estadístico

Lo primero que se debe hacer en un proceso, es verificar si está bajo control estadístico, lo que consiste en la aplicación de técnicas estadísticas para medir la calidad de los procesos. El control estadístico de la calidad incluye el control estadístico de los procesos, herramientas de diagnóstico, planes de muestreo y otras técnicas estadísticas (Juran y Gryna, 1993).

El control estadístico abrió las puertas a la innovación en ingeniería. Sin éste, el proceso estaba en un caos inestable, cuya interferencia enmascaraba cualquier intento de realizar mejoras. Cuando se logró el control estadístico, los ingenieros y los químicos se hicieron innovadores, creativos. Ahora disponían de un proceso identificable (Deming, 1989). Se define el control estadístico de procesos (CEP ó SPC), como un conjunto de técnicas que permiten medir, analizar y comprender el comportamiento de los procesos productivos, y con esta información hacer predicciones confiables sobre su futuro. Esta herramienta de análisis, permite detectar la presencia de una condición corregible que está afectando la calidad del proceso (Alvarado, 1993).

El control de la variación de un proceso, mediante herramientas estadísticas, se denomina control estadístico de procesos, el cual contribuye a identificar las causas que generan la variación. Todo proceso se puede predecir a partir de su control estadístico. Se puede medir su capacidad y verificar si es necesario modificarlo o diseñar uno nuevo. El control estadístico de procesos permite determinar la estabilidad temporal de los procesos de trabajo (CEPET, 1989 citado por Giallongo, 2000). Con el CEP se busca lograr que el

proceso esté en control, lo que implica la identificación y eliminación de las causas especiales de variación (Griffith, 1997 citado por Giallongo, 2000).

El problema estadístico básico en el control de calidad de un proceso es el de establecer un estado de control sobre éste, es decir, eliminar las causas especiales de variación y, luego, mantener ese estado de control en el curso del tiempo (Grant y Leavenworth, 1996)

El estudio de la capacidad es una forma de comparación entre la variabilidad permitida en el diseño del producto y la variabilidad obtenida en la fabricación del mismo. La variabilidad permitida en el diseño se refleja en las especificaciones y tolerancia del producto. La variabilidad obtenida en la fabricación se determina con el estudio estadístico del producto. Para el estudio de la capacidad de un proceso se utilizan herramientas estadísticas como histogramas de frecuencia, gráficos de control, límites de tolerancia, etc (Pérez, 1999).

La definición del control de procesos (C_p) es la siguiente:

$$C_p = \frac{LES - LEI}{6s} \quad (\text{Especificaciones bilaterales})$$

$$C_p = \frac{LES - \bar{X}}{3s} \quad (\text{Especificaciones unilaterales})$$

$$C_p = \frac{\bar{X} - LEI}{3s}$$

Y la evaluación del proceso usando C_p es como sigue:

- $1.33 \leq C_p$ (satisfactorio)
- $1.00 \leq C_p < 1.33$ (adecuado)
- $C_p < 1.00$ (inadecuado) (Kume, 1998)

3.2.2. Técnicas Estadísticas

Las técnicas estadísticas en la fabricación y el aseguramiento de la calidad han tenido una larga historia. En 1924, Walter A. Shewhart, de Bell Telephone Laboratories, desarrolló el concepto estadístico de los diagramas de control. Esto se considera generalmente el inicio del control estadístico de calidad. Los métodos estadísticos desempeñan un cometido vital en el aseguramiento de la calidad. Constituyen los medios principales para muestrear, probar y evaluar un producto, y para usar la información contenida en esos datos a fin de controlar y mejorar el proceso de fabricación (Montgomery, 1991a).

El éxito de los proyectos y actividades del mejoramiento de la calidad se refuerza mediante la aplicación apropiada de las herramientas y técnicas desarrolladas para estos propósitos (COVENIN-ISO 9004-4, 1995).

El 95 por ciento de los problemas de una empresa se pueden resolver con las siete herramientas del control de calidad. Los Métodos Estadísticos se pueden dividir en tres categorías: *Método estadístico elemental* (siete herramientas): diagrama de Pareto, de causa y efecto (Ishikawa o espina de pescado), estratificación, hoja de verificación, histograma, diagrama de dispersión, gráficas y cuadros de control; *Método Estadístico Intermedio*: teoría del muestreo, inspección estadística por muestreo, diversos métodos de realizar estimaciones y pruebas estadísticas, métodos de utilización de pruebas sensoriales y métodos de diseñar experimentos; por último el *Método Estadístico Avanzado*: método avanzado de diseñar experimentos, análisis de multivariantes y diversos métodos de investigación de operaciones (Ishikawa, 1986).

3.2.2.1. Diagrama de flujo

Una de las herramientas estadísticas es el *diagrama de Flujo*, el cual es una representación gráfica de los pasos de un proceso, útil para investigar oportunidades de mejoramiento mediante la comprensión detallada del funcionamiento real del proceso, es decir,

examinando como se interrelacionan los diversos pasos de un proceso, es posible descubrir fuentes potenciales de problemas (COVENIN-ISO 9004-4, 1995).

Para muchos productos y servicios lo más útil es construir un diagrama de flujo. Estos diagramas muestran la transformación de un producto o de un servicio conforme estos van pasando por las diversas etapas de su producción. Con este diagrama se facilita visualizar el sistema total, identificar posibles puntos de dificultad y ubicar las actividades de control (Besterfield, 1995). El diagrama de flujo del proceso transcribe el curso que sigue un determinado proceso (Gutiérrez, 1992). A continuación se presenta la Figura 2, como base para la realización de diagramas de flujo.

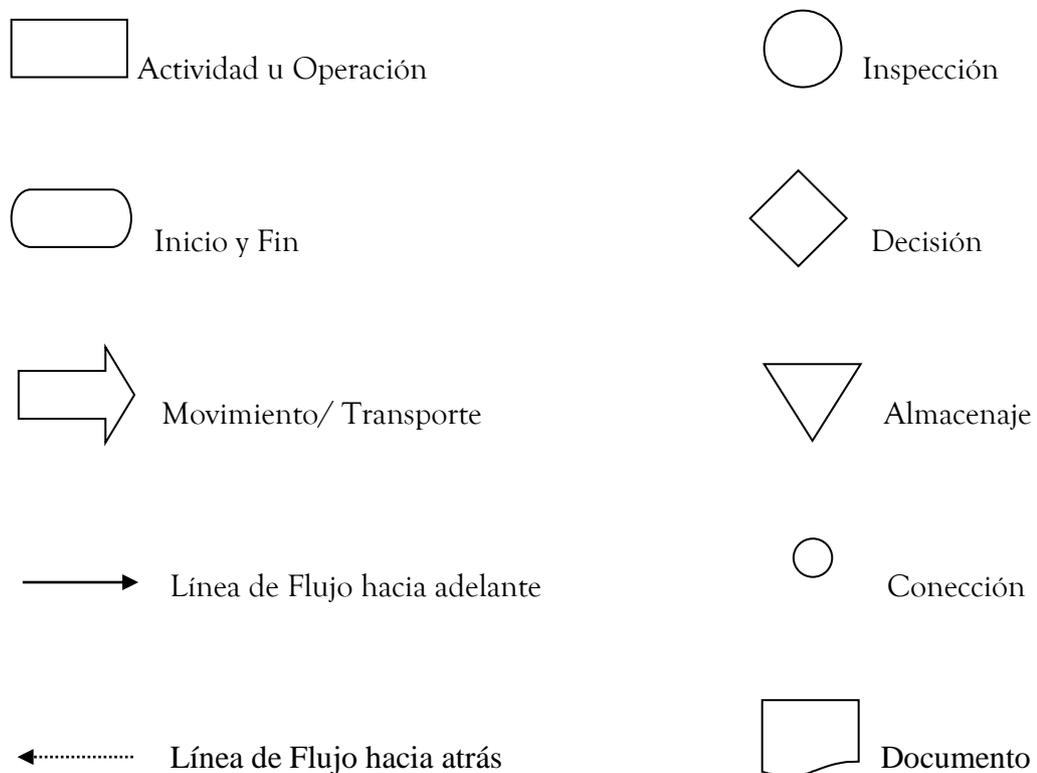


Figura 2: Símbolos usados en diagramas de flujo (Tribus, 1989 y Gutiérrez, 1992)

Entre los *tipos de diagramas de flujo* se encuentran:

- *D. de Bloques*: que proporcionan una visión rápida no compleja del proceso, los rectángulos (señalan actividades) y líneas con flechas (indican la dirección del flujo) son los principales símbolos de un diagrama de bloques, estos se usan para simplificar los procesos prolongados y complejos o para documentar tareas individuales
- *D. de flujo Estándar de la ANSI*: proporciona una comprensión detallada de un proceso que excede, en gran parte, el de bloque, se emplea cuando el proceso se acerca a la calidad de categoría mundial, para tener la seguridad de que los mejoramientos no se pierdan con el tiempo
- *D. de flujo Funcional*: es otro tipo de diagrama que muestra el movimiento entre diferentes unidades de trabajo, puede usar símbolos de los diagramas de flujo estándares o de bloque
- *D. de Flujo Funcional de la línea de Tiempo*: en este se adiciona el tiempo de procesamiento
- *D. de flujo Geográfico*: analiza el flujo físico de las actividades, este ayuda a minimizar el desperdicio de tiempo mientras la producción resultante del trabajo y/o recursos se desplazan entre las actividades (Harrington, 1992).

3.2.2.2. Gráficos de control

Los diagramas o gráficos de control son la herramienta primaria usada en el control estadístico de procesos; éstas permiten predecir la calidad de la producción de un proceso (Comité de Calidad Total, 1991).

El gráfico de control, es un trazo gráfico de los resultados de las pruebas con relación al tiempo o secuencia de las mediciones, con límites dentro de los cuales se espera que

caigan los resultados cuando el esquema analítico esté en un estado de control estadístico (Garfield, 1993). Se crean para representar de una forma ordenada y cronológica las informaciones recogidas sobre el resultado de las operaciones a lo largo de un periodo. Estos gráficos son muy útiles para analizar los factores que intervienen en la calidad (Pérez, 1999).

Los gráficos de control pueden clasificarse en dos **tipos generales**: gráfico de control por variables y gráfico de control por atributos. En el *gráfico de control por variable* es posible medir la característica de calidad objeto de estudio y expresarla como un número; también para contrastar características de calidad cuantitativas. Sin embargo, hay muchas características que no se miden en una variable cuantitativa, para estas se usan los *gráficos de control por atributos*.

Entre los gráfico de control *por variables* más importantes tenemos los siguientes:

- Gráfico de medias (\bar{X}) - gráfico de rangos (R), estos se usan para controlar y analizar un proceso en el cual la característica de calidad del producto que se está midiendo toma valores continuos, y esto proporciona la mayor cantidad de información sobre el proceso.
- Gráfico de medias (\bar{X}) - gráfico de desviaciones típicas (s), cuando el tamaño muestral es moderadamente grande, digamos $n > 10$ o 12, el método de la amplitud para estimar σ pierde eficiencia estadística. En estos casos es mejor reemplazar las gráficas de \bar{X} y R por las de \bar{X} y S^2 , donde se estima directamente la desviación estándar muestral S para cada subgrupo.
- Gráfico de medianas (\bar{x})
- Gráfico de individuos (X) - gráficos de rangos móviles (R), debido a que no hay subgrupo el valor del rango no puede calcularse, se usa el rango móvil de datos sucesivos para el cálculo de los límites de control de x.

Y por **atributos**:

- Número de unidades defectuosas (pn), se usa cuando la característica de calidad se representa por el número de unidades defectuosas. Es para una muestra de tamaño constante.
- Fracción de unidades defectuosas (p), se usa cuando la característica de calidad se representa por la fracción defectuosa. Es para una muestra de tamaño variable.
- Número de defectos (c), se usa para controlar y analizar un proceso por el número de defectos de un producto. Es para productos cuyas dimensiones son constantes.
- Número de defectos por unidad (u), se usa para controlar y analizar un proceso por el fracción defectuosa de un producto. Es para productos cuyas dimensiones son variables (Pérez, 1999).

Los gráficos de control *por variables relativos al número de individuos (X, R)* son apropiados en los casos siguientes: procesos en los que es inconveniente o imposible obtener más de una medición por muestra, o cuando mediciones repetidas difieren sólo por errores de laboratorio o de análisis. Esto ocurre a menudo en procesos químicos; situaciones en las que los datos se obtienen muy despacio y no sería práctico esperar una muestra mayor, lo que además hará el procedimiento de control demasiado lento para reaccionar a los problemas (Pérez, 1999).

Un fallo que se observa en todas partes cuando se incrementan los resultados, es que se supone que cada acontecimiento (defecto, error, accidente) es atribuible a alguien, o se relaciona con algún acontecimiento especial. La verdad es que la mayoría de los problemas en los servicios o en la fabricación residen en el sistema (Deming, 1989).

Existen dos tipos de **causas de dispersión** que afectan a los procesos y ocasionan la variación del producto, y también hoy, por tanto, dos tipos de variaciones: *causas no asignables*, *causas inevitables* o *causas de azar* (*causas comunes de variación*), es el tipo de causas

que hace aparecer la variación en el producto, aunque todos los agentes relacionados con el proceso trabajen siempre en él exactamente igual; la variación producida por ellas se llama “variabilidad controlada”. *causas asignables, o evitables (causas especiales de variación)*, es el tipo de causas que produce alguna anomalía en el proceso y origina una variación particularmente grande; la variación debida a estas se llama “variabilidad incontrolada” (Pérez, 1999).

La causa asignable o causa especial de variación se define como un factor (usualmente sistemático) que puede ser detectado e identificado como contribuyente a un cambio en una característica de la calidad o a un nivel del proceso. Y a las causas aleatorias o causas comunes de variación, como los factores (generalmente numerosos pero relativamente de poca importancia) contribuyentes a la variación, que no han sido necesariamente identificados (COVENIN-ISO 3534-2, 1995).

Los gráficos de control se caracterizan por presentar unos límites de control, los que se usan no para comprobar la calidad de cada unidad de producto, sino como una base para juzgar la significancia de las variaciones de calidad entre muestra y muestra, o de lote a lote, o de tiempo a tiempo, ofrecen un criterio para decidir cuando un proceso de producción está siendo alterado por causas asignables de variación (Norma Venezolana 4-1 65, s/f).

Es posible aplicar simultáneamente varios criterios diferentes al diagrama de control para determinar si el proceso está fuera de control o no, entre los cuales se pueden citar:

- Uno o más puntos fuera de los límites de control
- Una racha o serie de por lo menos 7 o 8 puntos consecutivos por encima o por debajo de la línea central
- Seis puntos consecutivos creciendo o decreciendo
- Catorce puntos consecutivos alternando crecimiento y decrecimiento
- Uno o más puntos cerca de los límites de control (Pérez, 1999)

3.2.2.3. Histogramas

Otra herramienta estadística a emplear es el histograma (o distribución) de frecuencias, que permite presentar muchos datos, de forma que quede clara la tendencia central y la dispersión a lo largo de la escala de medición (Juran y Gryna, 1993). En el histograma los datos se presentan como una serie de rectángulos de ancho igual y alturas variables; el ancho representa un intervalo dentro del rango de datos, la altura representa el número de valores de los datos dentro de un intervalo dado. El patrón de alturas variables muestra la distribución de los valores de los datos (COVENIN-ISO 9004-4, 1995)

Un histograma se utiliza para: representar el patrón de variación, comunicar información en forma visual acerca del comportamiento de un proceso y tomar las decisiones acerca de donde concentrar los esfuerzos de mejoramiento (COVENIN-ISO 9004-4, 1995).

Los límites de especificación son dados por el producto para definir los valores extremos permitidos de una característica de calidad, a fin de asegurar el rendimiento correcto de la unidad individual de producto (Norma Venezolana 4-1 65, s/f). Estos límites pueden ser utilizados para medir si el proceso es o no capaz de cumplir con las especificaciones.

Con frecuencia, después de que el histograma muestra que sigue una distribución normal, se inicia un estudio de la capacidad del proceso. Esto se hace para saber si el proceso puede o no cumplir con las especificaciones (Kume, 1998), para ello se calcula el índice de la capacidad del proceso (ICP), el cual es un valor de la tolerancia especificada para la característica, dividida por la capacidad del proceso (COVENIN-ISO 3534-2, 1995)

3.2.2.4. Diagrama de dispersión

Un diagrama de dispersión se utiliza para descubrir y representar las relaciones entre dos conjuntos de datos asociados y para confirmar las relaciones previstas entre dos conjuntos de datos. Es una técnica gráfica para estudiar las relaciones entre dos conjuntos de datos

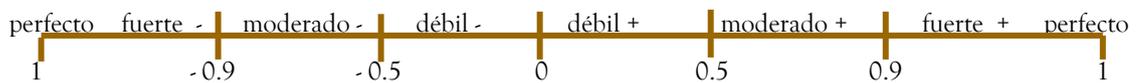
asociados que ocurren en pareja. Representa los pares de datos como una nube de puntos, las cuales permiten deducir las relaciones entre los conjuntos de datos asociados (COVENIN-ISO 9004-4, 1995).

Hay muchos tipos de **formas de dispersión**, y algunas formas típicas son: *correlación lineal positiva*, donde la variable dependiente crece cuando crece la independiente, pero dentro de la C. lineal positiva existe la *fuertemente positiva*, la cual muestra la tendencia de una manera muy pronunciada; *correlación lineal negativa*, lo opuesto a la positiva, pues a medida que aumenta la variable independiente, disminuye la dependiente, también existe la *fuertemente negativa*; y si las variables dependientes e independientes no muestran alguna relación particular, se dice que *no hay correlación lineal* (Kume, 1998).

Para estudiar la relación entre dos variables es importante hacer primero un diagrama de dispersión; sin embargo, para comprender la fuerza de relación en términos cuantitativos, es útil calcular el *coeficiente de correlación lineal* (r). El cual cuando:

- r está cerca de 1 indica una correlación lineal fuerte entre las dos variables
- r cerca de 0, indica una correlación lineal débil
- $r = 1$ ó $r = -1$, los datos aparecerán en línea recta (Kume, 1998).

El “ r ” sólo comprueba si dos variables están o no correlacionadas. De ninguna forma contrasta si la correlación que existe tiene alguna importancia práctica. A continuación se presenta una escala que puede indicar si la correlación que se presenta es débil, moderada o fuerte, a partir del coeficiente de correlación (Milton, 1994).



3.2.2.5. Diseño de la prueba.

El origen de los datos que se desea analizar para resolver problemas es un punto muy importante, por ello se comentará sobre los “datos históricos” y los “datos de experimentos planificados”

Los “*Datos Históricos*” son datos que ya se tienen y que parece pueden ser relevantes ante una cuestión o un problema que ha aparecido. Generalmente, puede obtenerse mucha más información de un experimento cuidadosamente diseñado que de un amplio análisis de datos históricos recogidos en circunstancias incontroladas. Lo mejor que, habitualmente, se puede esperar del análisis de tales datos históricos, es la indicación de las variables más importantes a incluir en el experimento (Juran y Gryna, 1993).

Los “*Datos a partir de experimentos planeados*” se obtienen a fin de poder estudiar la producción u otros problemas que han aparecido o que se sospecha que aparecerán. Se recogen varios conjuntos de variables que parecen ser de importancia, mientras se mantienen constantes todas las otras variables que es concebible tengan algún efecto sobre la salida (Juran y Gryna, 1993). La Data Experimental es obtenida en la presencia de condiciones especiales, materiales especiales, y técnicas especiales. La esencia de la data experimental es la decisión referente a la relación entre un factor y la variable respuesta (Wheeler, 1990).

Diseñar un experimento es planificarlo de forma tal, que reúna la información que se requiere del problema planteado en la investigación. Consiste, en una secuencia de pasos que garanticen que los datos que se obtienen haga posible un análisis objetivo, el cual permitirá llegar a interpretaciones, conclusiones y recomendaciones válidas en el estudio (Chacín, 2000).

Se debe planificar la manera como se van a recoger los datos, su análisis para sacar conclusiones estadísticas y convertirlos en la respuesta al problema técnico original. Para lograrlo, se debe: *Recoger suficiente información; Planificar la recogida de datos:* determinar el

tipo de datos necesarios, determinar si se puede disponer de datos anteriores que puedan ser aplicables al problema actual, si el problema requiere la evaluación de varias decisiones alternativas obtener información de las consecuencias económicas de una decisión equivocada, determinar si el error es suficientemente grande como para influir en el tamaño de la muestra o en el método de análisis de los datos, definir el método de análisis de los datos y cualquier asunción necesaria, definir los requisitos de los programas de computación que puedan ser necesarios; *Recoger los datos*: registrar los datos y todas las condiciones presentes en el momento de realizar cada observación, examinar los datos de la muestra para asegurar que el proceso muestra suficiente estabilidad para hacer predicciones válidas para el futuro; *Analizar los datos*: aplicar técnicas estadísticas para evaluar el problema original, determinar si son necesarios los datos y análisis posteriores; *Presentar los resultados*: exponer las conclusiones de forma comprensible; *Determinar si las conclusiones del problema específico son aplicables a otros y si los datos y los cálculos pueden ser útiles en otros problemas* (Juran y Gryna, 1993).

Para la obtención de la data experimental se debe *planificar el diseño* a aplicar; ya que un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (Montgomery, 1991b).

Hay algunos autores que incorporan al diseño de experimentos dentro del control estadístico de procesos como una herramienta más de uso (Montgomery y Runger, 1995 citados por Montaña, 2000). Sin embargo la mayoría de los autores no lo hacen por considerar al control estadístico de procesos como un enfoque en línea que se usa para mejorar la calidad usando exclusivamente técnicas que se fundamentan en la observación pasiva del proceso, mientras que el enfoque que se le da al diseño de experimentos es uno activo, donde se introducen cambios intencionales en las variables del proceso, a lo cual consideran ellos esto un enfoque fuera de línea (Montaña, 2000).

Un *Diseño Completamente Aleatorizado* es aquel que se constituye adjudicando los tratamientos a las unidades experimentales en tal forma que cualquier ubicación de aquellos es posible (Monzón, 1992). Es un diseño de mucha utilidad en todos los campos de la ciencia, siempre y cuando se consiga homogeneidad del material experimental y del mismo sitio donde se vaya a desarrollar el experimento. Es muy ventajoso ya que:

- tanto la planificación como el análisis son los más simples si se les compara con los otros diseños conocidos;
- produce el máximo número de grados de libertad para el error experimental, lo que es muy útil en pequeños ensayos;
- cuando existe un número desigual de replicaciones por tratamiento no es causa de complicaciones en el análisis estadístico
- es de fácil manejo en el campo y en el laboratorio.

Pero tiene como desventaja:

- que sólo puede usarse con material experimental homogéneo, ya que si el material es heterogéneo, no se puede aumentar mucho el tamaño del experimento, porque motivan variaciones altas que enmascaran el efecto del experimento (Chacín, 2000)

Un habitual plan estadístico de experimentación es el *plan factorial*, que es apropiado cuando han de ser investigados varios factores a dos o más niveles y la interacción de los factores puede ser importante; su estructura es básica, donde se investigan varios factores, cada uno a varios niveles, ensayando todas las combinaciones de factores y niveles; la información que se busca es: estimar y comparar los efectos de la interacción y estimar la varianza (Juran y Gryna, 1993). Los experimentos factoriales son de gran valor en trabajos exploratorios cuando se sabe poco sobre los niveles óptimos de los factores, o ni siquiera cuales son importantes (Steel y Torrie, 1988).

El experimento factorial es aquel que incluye como tratamientos, a todas las combinaciones posibles que surgen de combinar cada nivel de un factor, con los niveles de los restantes factores bajo estudio (Monzón, 1992).

Frecuentemente aún una sola repetición de un experimento factorial va más allá de los recursos del investigador, o da más precisión que la necesaria en las estimaciones de los efectos principales. En situaciones como éstas vale la pena considerar un experimento que consista en sólo una parte de una repetición completa (Cochran y Cox, 1990).

El uso de experimentos en *repetición fraccionada* fue propuesto en 1945 por Finney, quien delineó los métodos de construcción de los factores 2^n y 3^n , y describió la mitad de una repetición de un experimento agrícola 4×2^4 , que se había llevado a cabo en 1942. En 1946, Plackett y Burman (citados por Cochran y Cox, 1990) obtuvieron los diseños para el tamaño mínimo posible de experimentos con factoriales p^n ($p = 2, 3, \dots, 7$), y señalaron su utilidad en la investigación en física y en la industria (Cochran y Cox, 1990).

La fracción más grande del diseño 3^k que resulta útil es la de un tercio y consta de 3^{k-1} ensayos. Para construir este diseño se selecciona un componente de interacción de dos grados de libertad y el diseño 3^k completo resulta en tres bloques. Cada uno de estos bloques corresponde a un diseño factorial 3^{k-1} , y es posible elegir cualquiera de ellos para usarse (Montgomery, 1991b).

Estos diseños se agrupan en clases de acuerdo con las relaciones de aleatorización que existen en el diseño, estos grupos se identifican por su resolución. Los diseños más comunes son aquellos con resolución III, IV y V:

- *Resolución III*: diseño en el que ningún efecto principal se confunde con otro efecto principal, pero los efectos principales se confunden con interacciones de dos factores y éstas con otras interacciones de dos factores.
- *Resolución IV*: diseño en el que ningún efecto principal se confunde con otro efecto principal o con una interacción de dos factores, pero éstos se confunden entre sí.
- *Resolución V*: diseño en el que ningún efecto principal ni interacción de dos factores se confunde con otro efecto principal o interacción de dos factores, pero éstas últimas se confunden con las interacciones de tres factores (Kuehl, 2001).

Los diseños factoriales fraccionados usan sólo la mitad, la cuarta parte o incluso una fracción menor de las 2^n combinaciones de tratamientos y se usan por una o varias de las siguientes razones:

- El número de tratamientos necesarios excede a los recursos
- Se necesitan estudios exploratorios para muchos factores, etc (Kuehl, 2001).

El principal atractivo de este tipo de experimentos estriba en que permiten incluir varios factores en un experimento de tamaño práctico, de tal manera que el investigador pueda determinar rápidamente cuales factores tienen un efecto importante sobre el resultado. Pero, los mismos están propensos a una mala interpretación, que no se presentaría en diseños totalmente repetidos (Cochran y Cox, 1990).

Al utilizar una fracción de un arreglo de tratamientos factorial es posible que dos o más efectos se estimen con el mismo contraste; dos o más efectos que tienen esta propiedad se conocen como **alias**¹.

Los diseños factoriales fraccionarios pueden proyectarse en diseños más poderosos (más grandes) en el subconjunto de factores significativos. Cualquier diseño factorial fraccionado de resolución R contiene diseños factoriales completos (o posiblemente réplicas de diseños factoriales) de cualquier subconjunto de $R - 1$ factores (Montgomery, 1991 b)

En esta investigación, se van a emplear las herramientas estadísticas desarrolladas anteriormente para evaluar el tiempo de reacción del proceso de obtención de un almidón modificado químicamente.

¹ Machado, W. 2001. Universidad Central de Venezuela, facultad de Agronomía (comunicación personal)

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Desarrollo del ensayo

La presente investigación fue realizada en una industria manufacturera, durante el período comprendido entre enero a julio del presente año.

4.2 Materiales y equipos empleados en los ensayos de laboratorio

4.2.1 Ensayo preliminar

Para este ensayo se tomaron tres sacos de almidón de yuca regular, a tres pH diferentes (bajo, medio, alto), agua de pozo (suspensiones), catalizador, fosfato, base, ácido (neutralizar las muestras), agua destilada (pruebas), viscógrafo, filtro, agitador mecánico, pH metro y vasos de precipitado de 100, 200 y 5000 ml.

4.2.2 Ensayo final

Se emplearon tres sacos de almidón de yuca regular a tres viscosidades diferentes (baja, media, alta), catalizador (bajo, medio, alto), una base, fosfato (bajo, medio, alto), agua de pozo (suspensiones), ácido (neutralizar las muestras), agua destilada (pruebas), viscógrafo, filtro, agitador mecánico, pH metro y vasos de precipitado de 100, 200 y 5000 ml.

4.3 Herramientas y procedimientos empleados para analizar la información.

Se empleó para el análisis de la data y para la obtención de los gráficos los paquetes estadísticos Statgraph versión 2,1 y Statistix.

Inicialmente, se describió brevemente el procedimiento para la obtención a escala piloto (laboratorio) de un almidón modificado mediante un proceso químico hasta su neutralización; empleando el **diagrama de flujo estándar de la ANSI**, como herramienta

estadística para visualizar y describir, cada una de las operaciones y/o etapas involucradas en este proceso; con la finalidad de descubrir fuentes potenciales de problemas, es decir, localizar las causas que podían influir en la viscosidad y el tiempo de reacción del proceso.

Luego para detectar algunas características de calidad de la materia prima y variables del proceso que afectarían la viscosidad y el tiempo de reacción; se aplicaron herramientas estadísticas tales como histogramas, gráficas de control y diagramas de dispersión a la data histórica de:

- Características de calidad de materia prima (almidón regular de yuca), tales como: pH, viscosidad (U.B) y temperatura de gelatinización (°C); en el período de enero-2000 a diciembre-2000
- Variables del proceso: pH inicial de la reacción, catalizador (Kg), fosfatador (Kg), viscosidad (U.B), °Be y Kg sustancia seca; en el lapso comprendido de enero-2000 a enero-2001.

El Histograma se aplicó para observar el patrón de variación de los datos (materia prima y proceso), si seguían una distribución normal y verificar si las características de calidad y las variables eran capaces de cumplir con las especificaciones.

Con las Gráficas de Control se pretendió inferir sobre la variabilidad y el estado de control de las características de calidad de la materia prima y variables del proceso, permitiendo detectar los factores que influían sobre el mismo, es decir, con una misión de carácter analítico. Para ello se empleó la gráfica de control para **individuos**; ya que en esta industria como en la mayoría, especialmente cuando emplean procesos químicos, no se cuenta con varias mediciones por muestra o lote de producción.

Simultáneamente, para estudiar si existía alguna relación entre el conjunto de características de calidad de la materia prima y/o variables del proceso, que se manifestaron simultáneamente, y su intensidad; se aplicaron los Diagramas de Dispersión.

Una vez obtenidos los resultados del empleo de las herramientas anteriores, es decir, detectadas las características de calidad de la materia prima influyentes en el tiempo de reacción y la viscosidad, se efectuó un ensayo preliminar a nivel piloto (laboratorio), para evaluarlas a través del diseño de experimentos, a fin de verificar la influencia de las mismas sobre la viscosidad y el tiempo de reacción; a la vez disminuir, lo más posible, el número de variables totales (materia prima y proceso) que se considerarían en el ensayo final.

El diseño aplicado fue el **diseño completamente aleatorizado** con tres réplicas bajo un arreglo factorial, ya que se consideraron las condiciones de experimentación homogéneas, por haberse llevado a cabo el experimento en un laboratorio y un sólo experimentador. Los factores evaluados fueron:

- pH del almidón de yuca regular (A); cuyos niveles fueron: a_0 (pH bajo), a_1 (pH intermedio) y a_2 (pH alto).
- Suspensión del almidón regular (B); cuyos niveles fueron: b_0 (del mismo día) y b_1 (del día anterior)

Cabe destacar que el factor “A” se obtuvo a partir de los resultados del empleo de las herramientas mencionadas en párrafos anteriores, y el “B”, mediante la experiencia del personal que labora en la planta donde se realizó el experimento y lo observado por el experimentador con el diagrama de flujo del proceso de elaboración del almidón modificado químicamente.

Finalmente, se evaluó con el uso del diseño de experimentos, la relación entre las variables influyentes (detectadas con las herramientas y el ensayo preliminar) en el tiempo de reacción y la viscosidad del proceso de fabricación de un almidón modificado químicamente (a nivel de laboratorio). A fin de obtener el o los tratamientos que arrojaran un mejor resultado, es decir, un adecuado tiempo de reacción para la obtención de un almidón con una viscosidad dentro de especificaciones (“en código”).

El diseño empleado fue un “factorial fraccionario 3^{k-1} ensayos (3^{4-1}_{IV} con $I=AB^2CD$)”, en el cual se evaluaron cuatro factores a tres niveles bajo, intermedio y alto cada uno:

- Viscosidad del almidón regular (A)
- Catalizador (B)
- Fosfato (C)
- pH para la reacción (D)

En este experimento no se evaluaron pH del almidón regular, ni el día de la suspensión del almidón regular de yuca, debido a que se observó que no influían significativamente sobre el tiempo de reacción y la viscosidad del proceso de obtención del almidón de yuca modificado químicamente.

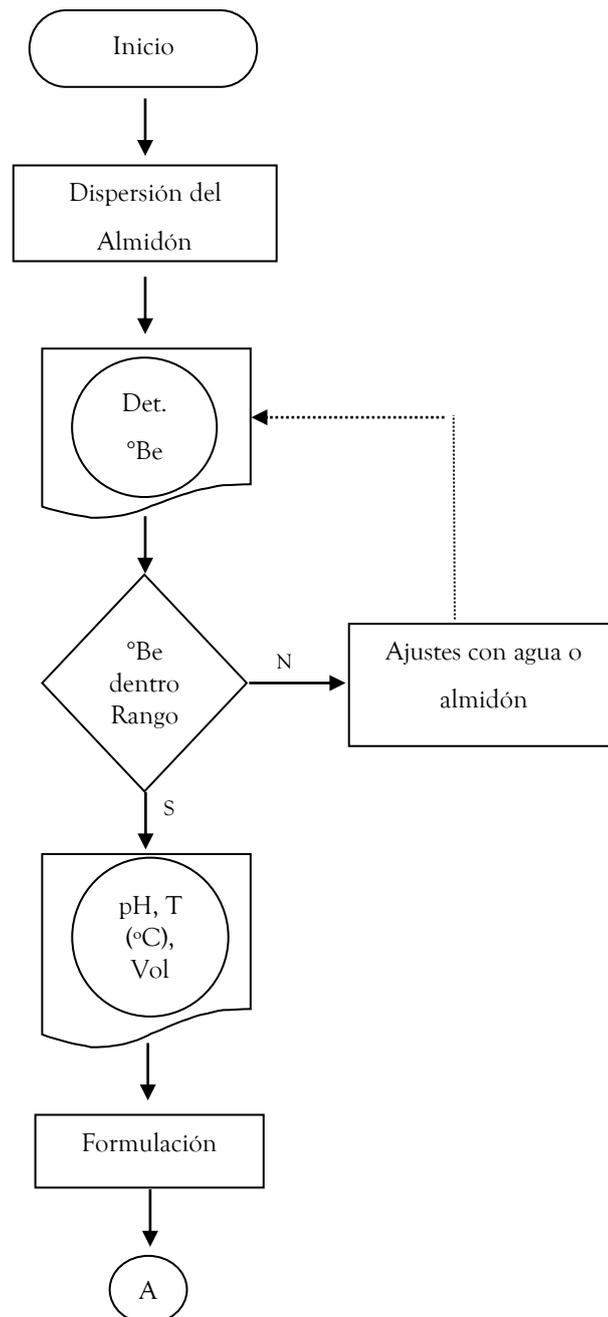
Se empleó este diseño por considerarse el más adecuado por las condiciones de experimentación, el corto tiempo para la misma y la gran cantidad de tratamientos a evaluar (81 tratamientos).

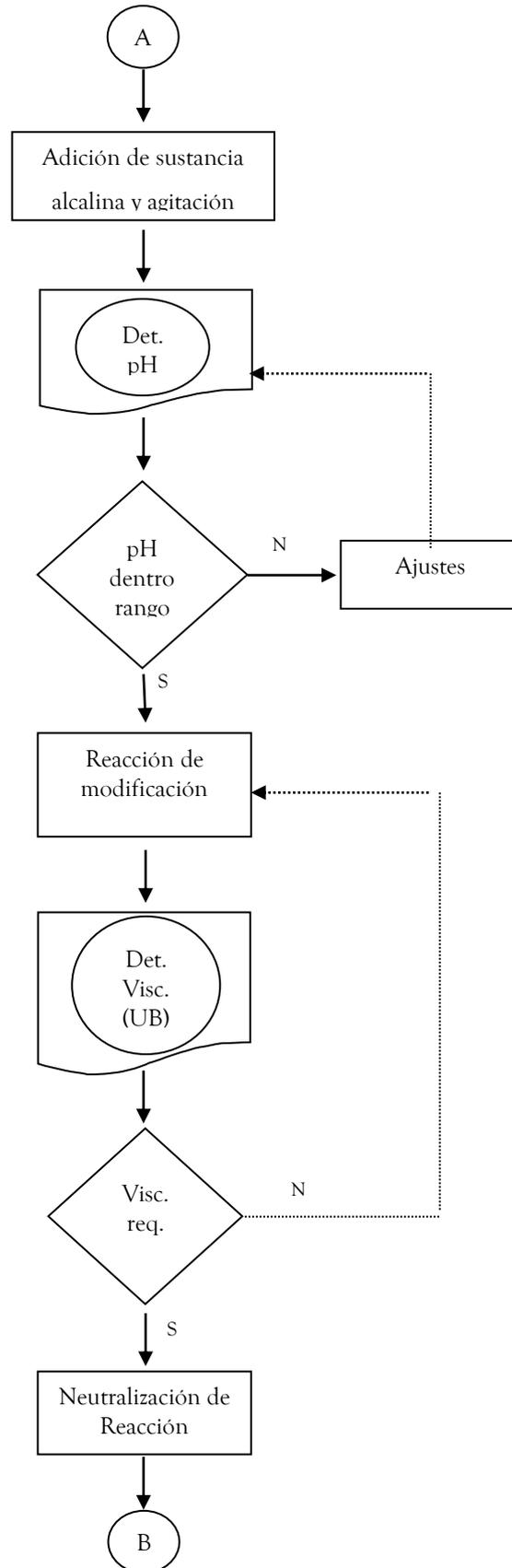
Una vez obtenidos los resultados del factorial fraccionado, se realizó una proyección del factorial fraccionado, para observar si alguna interacción que haya sido alia es significativa o no.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Diagrama de Flujo del ensayo

En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo donde se muestra paso a paso el procedimiento para la obtención a escala piloto de un almidón modificado químicamente hasta su neutralización, realizado empleando la simbología presentada en la Figura 2.





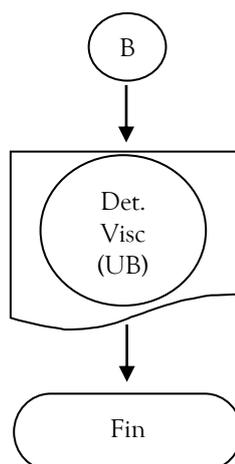


Figura 3: Diagrama de flujo del proceso de obtención de un almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado químicamente a nivel piloto hasta su neutralización

El proceso mostrado en la Figura 3 es similar al de fabricación de la empresa. Sin embargo es importante señalar que la formulación depende de los °Be, el volumen de la suspensión y la cantidad de cada reactivo según el tratamiento aplicado. Se **ajustó el pH** con un álcali para adaptar el medio (suspensión) y llevar a cabo la reacción de modificación. Una vez alcanzado el pH esperado, se agregó el catalizador y luego de un tiempo determinado el reactivo bi o polifuncional (fosfato), para el inicio de la **reacción de modificación** del almidón; según la cantidad de los reactivos y el pH inicial, la reacción fue muy rápida o demoró, por lo que se evaluó el proceso, analizando la viscosidad cada 15 min., hasta que la misma se encontrara en el rango de valor requerido.

Durante los ensayos se pudo observar que con algunas combinaciones de tratamientos la reacción era más lenta (niveles más bajos) y rápida (en los niveles altos de los tratamientos). La temperatura se mantuvo lo más constante posible durante la ejecución de los ensayos, porque se observó que la misma influía en acelerar la reacción mientras más alta era, esto se detectó en unos ensayos de práctica, dichos datos no se conservaron porque la viscosidad no cumplió con la especificaciones. A pesar de lo anterior no se pudo evaluar la influencia de la temperatura, ya que no se contó en “todo” el

experimento con un dispositivo para calentar la suspensión hasta la temperatura de proceso y variarla, por lo que se mantuvo constante.

5.2 Herramientas Estadísticas

5.2.1 Aplicación de gráficas de control, histogramas y diagramas de dispersión a la data histórica

● Características de calidad de la materia prima (almidón regular de yuca) para el período enero-2000 a diciembre-2000

1. pH del almidón regular de yuca: en la Figura 4 de precisión (Rango móvil), se observan 6 puntos fuera del límite superior de control, por lo que esta característica de calidad se encuentra fuera de control estadístico; lo que indica una alta variabilidad de los datos, que se nota claramente en la gráfica. Debido a ello no es necesario interpretar la gráfica de individuos (X); antes se debe reducir la variabilidad del pH del almidón regular de yuca, luego verificar la existencia o no de patrones en la gráfica de individuos, ya que como lo expresa Montgomery (1991a) en esta gráfica se supone que las observaciones individuales no están correlacionadas.

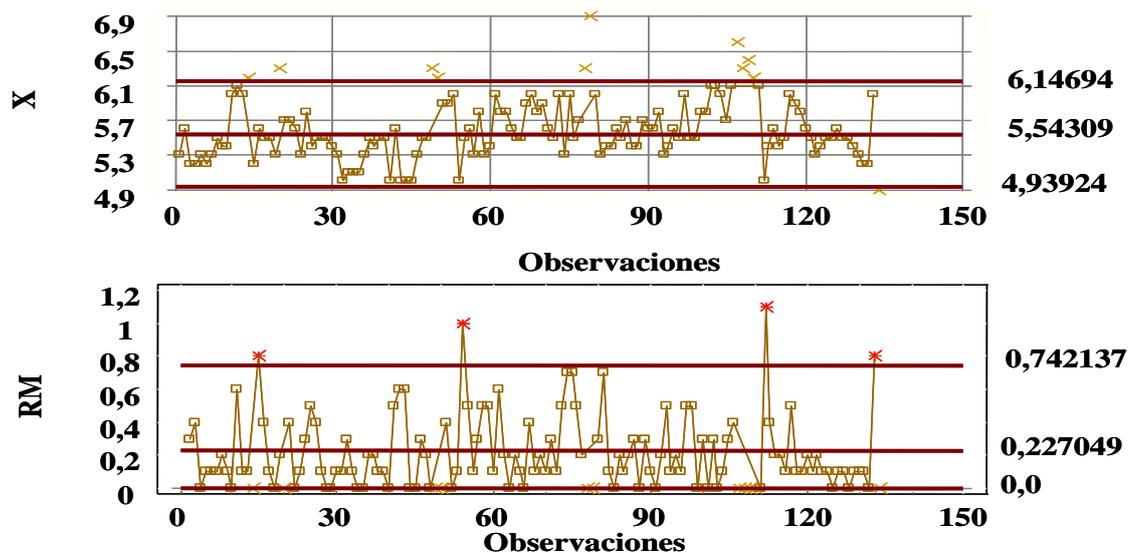


Figura 4. Gráfica de control de pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Se recalcularon los límites de control eliminando los puntos fuera de control, y se obtuvo que existe aún una alta variabilidad de los datos ya que como se observa en la Figura 5 hay cuatro puntos fuera de control en la gráfica de rango móvil (RM).

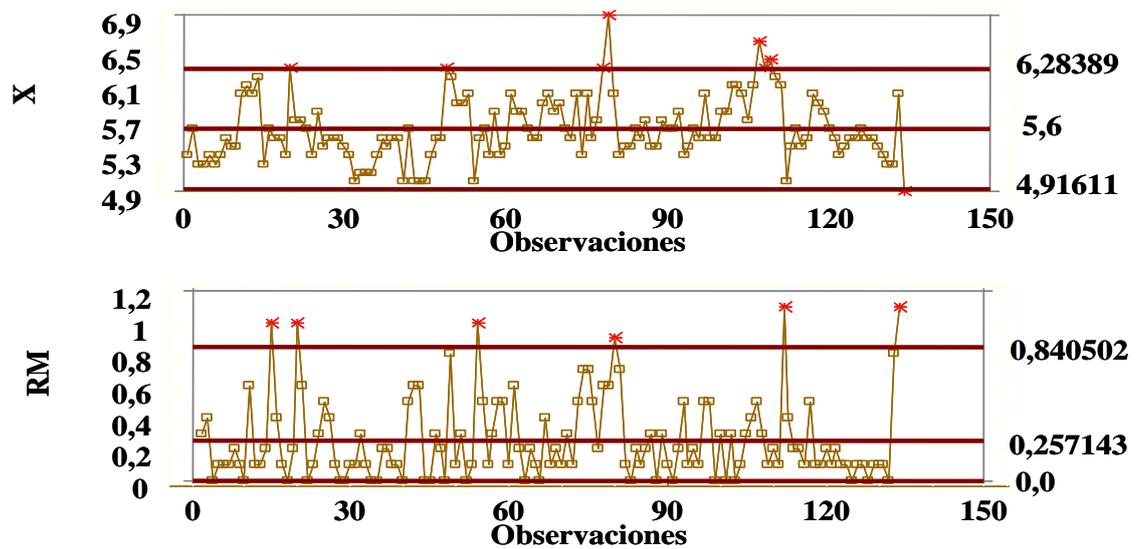
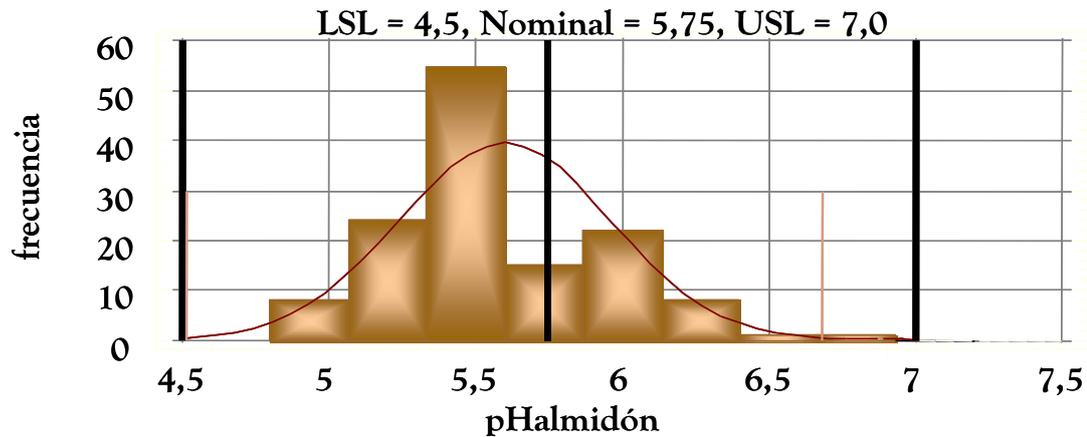


Figura 5. Gráfica de control (límites recalculados) de pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Se realizó el histograma de frecuencias y se calculó la capacidad (ver Figura 6), en el que se observa una distribución normal de los datos. El pH de la materia prima es capaz satisfactoriamente de cumplir con las especificaciones ya que el $C_p = 1,15$ es mayor de 1,33; además el mínimo valor (4,9) y el máximo (6,3. ver Anexo A) no sobrepasan los límites, presentan gran holgura; en cuanto al descentrado se puede mencionar que no coincide el promedio (5,60) con el valor nominal 5,75, lo cual indica que el proceso está descentrado a la izquierda, lo cual puede verificarse con el C_{pk} (1,21) que es el menor.



$$C_p = 1,15396$$

$$C_{pk} = 1,01548 \quad C_{pk} \text{ (upper)} = 1,29243 \quad C_{pk} \text{ (lower)} = 1,01548$$

$$C_r = 0,866583 \quad C_{pm} = 1,06507 \quad K = -0,12$$

Figura 6. Histograma de pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Además se realizó un histograma al eliminar las observaciones fuera de los límites, de la gráfica de control, para observar la influencia de ello sobre la variabilidad. Se obtuvo la Figura 7 donde se puede notar que se reduce la variabilidad, por lo que aumenta la capacidad del proceso ($C_p = 1,45$)

Como se puede observar en las figuras 6 y 7, es decir, eliminando los puntos fuera de los límites, disminuye la cantidad de puntos fuera de control y aumenta el C_p . Ello es de gran importancia, ya que demuestra que si se reduce la variabilidad aumenta la capacidad del proceso de cumplir con las especificaciones.

En el **Diagrama de dispersión** al relacionar el pH con la viscosidad del almidón regular de yuca se obtuvo una probabilidad de 0,7256 (mayor que $\alpha = 0,05$), por lo que se no rechaza la H_0 (de que no hay correlación entre las características de calidad). La correlación débil ($r=0,0306$), basándose en lo expresado por Milton (1994), es muy baja

por lo que se puede concluir que no existe una asociación lineal entre ambas características. Esto puede verificarse observando la Figura 8.

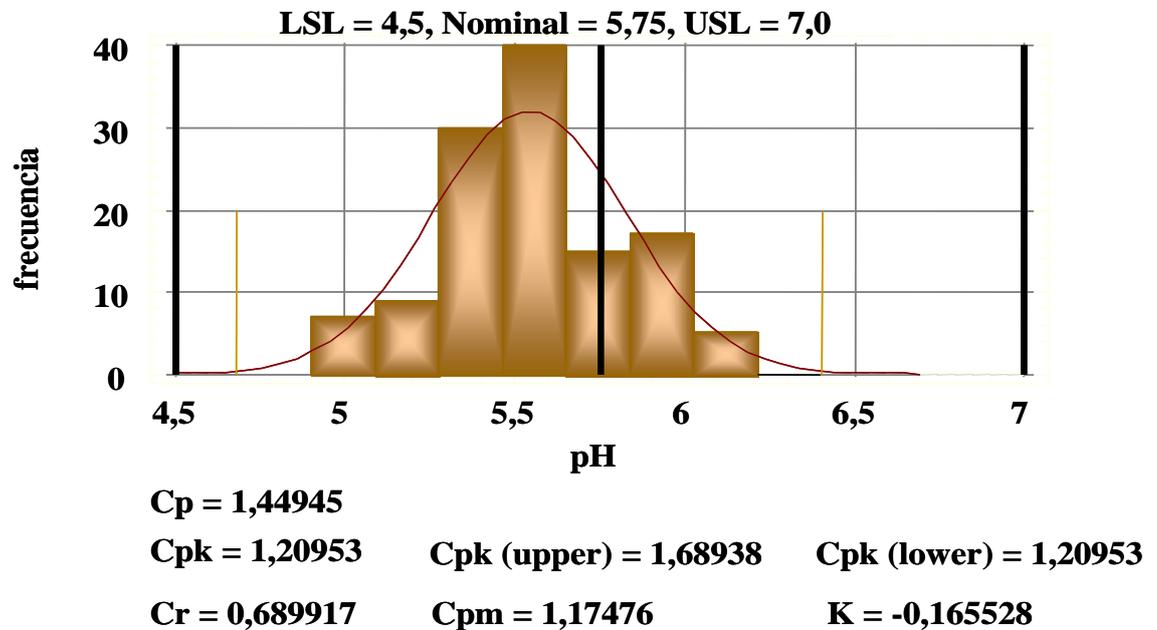


Figura 7. Histograma (recalculado) de pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Al relacionar el pH de la materia prima y el tiempo de reacción del proceso se obtuvo una probabilidad de 0,0288 (menor que $\alpha = 0,05$), por lo que se rechaza la H_0 (de que no hay correlación entre ambas). Por lo que existe una asociación lineal negativa débil entre el pH y el tiempo de reacción ($r = -0,2924$); esto puede verificarse observando la Figura 9. Pero lo mismo no sucede con la viscosidad del proceso, que presenta una probabilidad de 0,2986 (mayor que $\alpha = 0,05$), por lo que se no rechaza la H_0 (de que no hay correlación entre ambas características de calidad). La correlación débil ($r = 0,1414$), no es lo suficientemente grande para poder concluir que existe una asociación lineal entre la viscosidad y el pH de la materia prima (ver Figura 10).

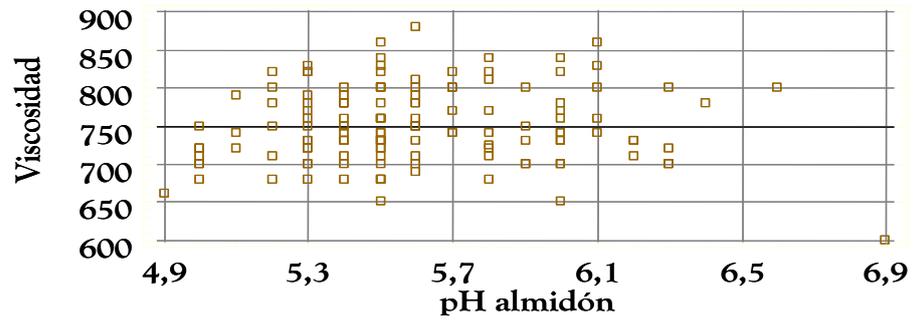


Figura 8. Diagrama de dispersión de viscosidad del almidón regular (UB) vs pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

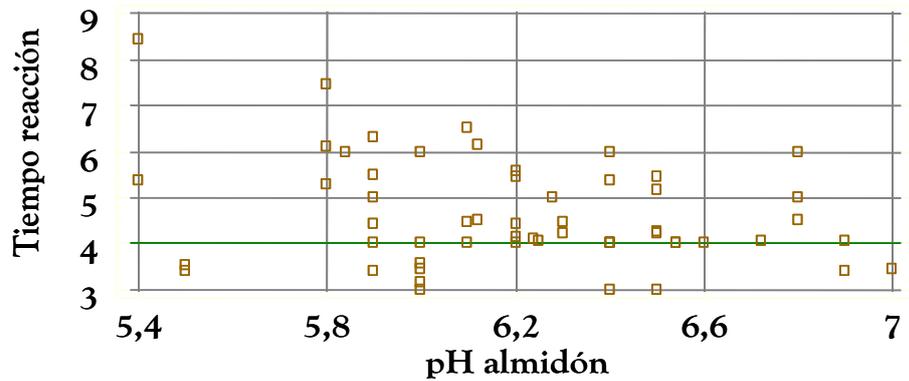


Figura 9. Diagrama de dispersión de tiempo de reacción (h) vs pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

El pH es una característica de calidad de la materia prima considerada importante, la cual podía influir en la viscosidad y el tiempo de reacción del proceso; se debe recordar que en reacciones químicas tanto la concentración de los reactivos como el pH influyen en la velocidad de reacción.

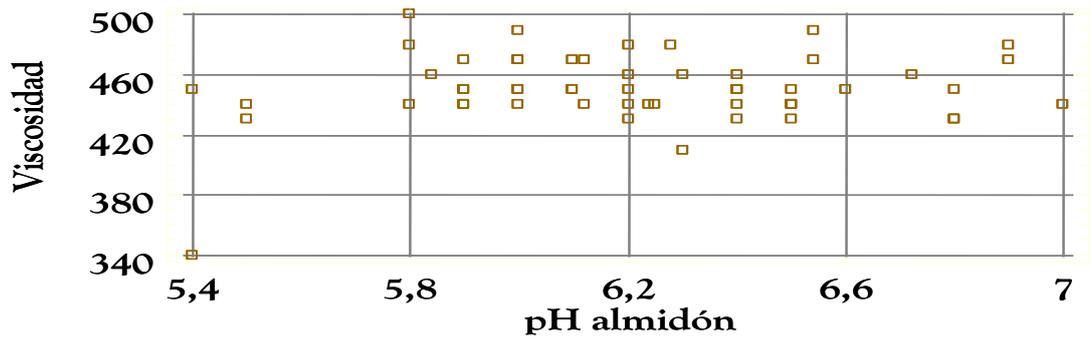


Figura 10. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del proceso vs pH del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

2. Viscosidad del almidón regular de yuca: al igual que el pH el Gráfico de Control (ver Figura 11) muestra que la característica está fuera de control. Presenta la gráfica de rango móvil (RM), 4 puntos fuera del limite superior de control.

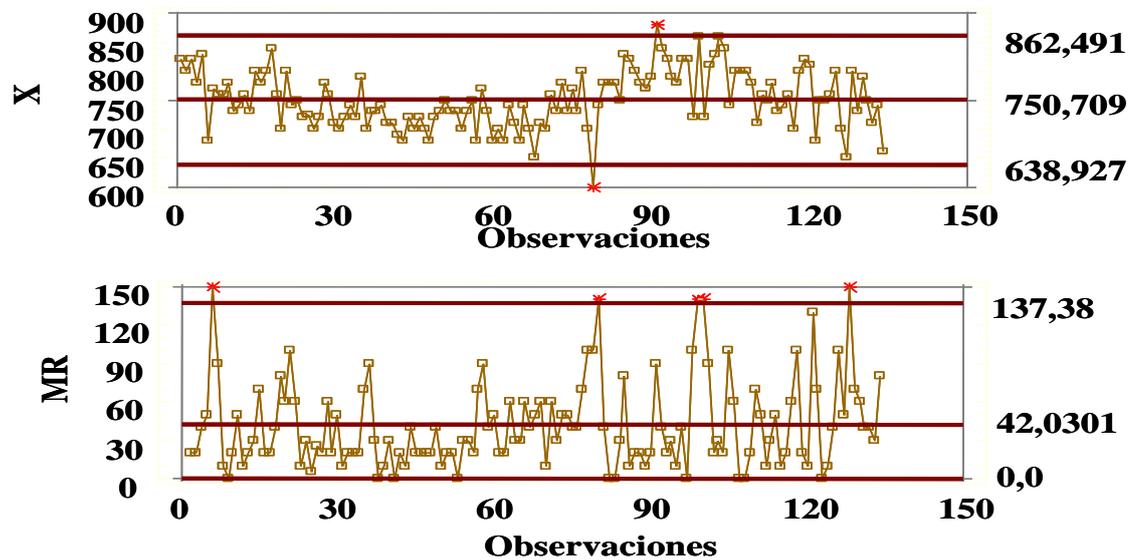
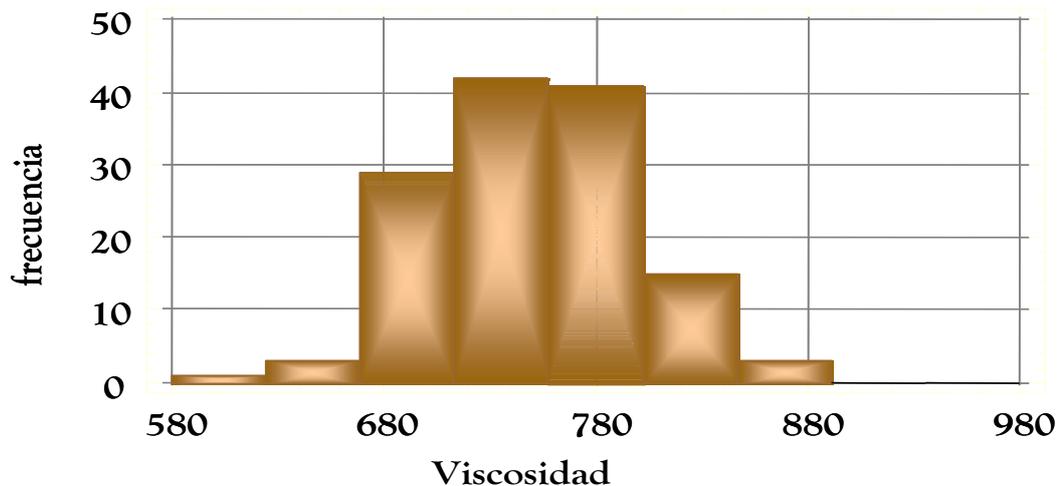


Figura 11. Gráfica de control de viscosidad (U.B) del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

En el **Histograma** (ver Figura 12) se observa que hay una distribución normal de los datos. Para esta característica sólo hay un límite de especificación inferior (400 U.B), por lo que el C_p unilateral de 2,35 señala que la materia prima es capaz de cumplir con la especificación satisfactoriamente. Se podría considerar centrada debido a que el promedio de 750,71 U.B (ver Anexo A) coincide con el pico más alto del gráfico (700–780 U.B). Además hay una baja variabilidad.



$$C_p = \frac{\bar{X} - LEI}{3 \times S} = \frac{750,71 - 400}{3 \times 49,67} = 2,3536$$

Figura 12. Histograma de viscosidad (U.B) del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

El **Diagrama de Dispersión** entre la viscosidad y la temperatura de gelatinización del almidón regular de yuca (ver Figura 13) muestra que es muy baja la asociación lineal entre las características ($r= 0,1778$, $p= 0,0398$), lo reitera el valor de probabilidad, que por ser menor de $\alpha = 0,05$, indica que es significativa la correlación entre ambas características.

Se debe destacar que la viscosidad es una característica que se decidió incluir en los experimentos, no sólo por su variabilidad, sino también por observarse que en el proceso variaba notablemente la viscosidad final del almidón modificado y por ende el tiempo de reacción; es decir, a viscosidades cercanas al límite de especificación inferior, la reacción era muy rápida y se perdió en muchos casos, por el contrario cuando era muy alta demoraba más la reacción.

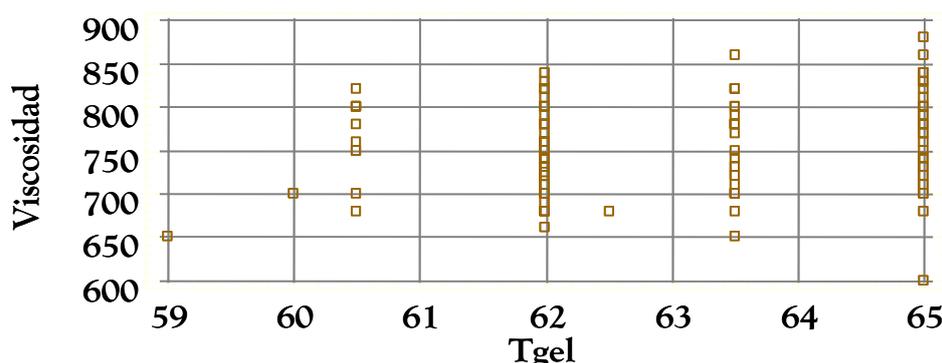


Figura 13. Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del almidón regular vs temperatura de gelatinización (° C) del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

3. **Temperatura de gelatinización:** en la **Gráfica de Control** (ver Figura 14) se observa que está fuera de control estadístico; a pesar de que la variabilidad es baja, en el gráfico de precisión (X - bar) se verifica que esta característica está fuera de control no sólo por la gran cantidad de observaciones que se salen de los límites de control, sino por los patrones presentes.

El **Histograma** (ver Figura 15) muestra que no hay una distribución normal. Hay una mayor frecuencia de datos en 4 picos aislados, debido probablemente a una anomalía en el proceso o bien errores de medición. La media de 62,89 °C (ver Anexo A) no coincide con la barra más alta del gráfico, está descentrada a la izquierda ($C_{pk_i} = 1,09563$). Es capaz de cumplir con las especificaciones (58 - 68 °C) adecuadamente ($C_p = 1,11$), presenta holgura.

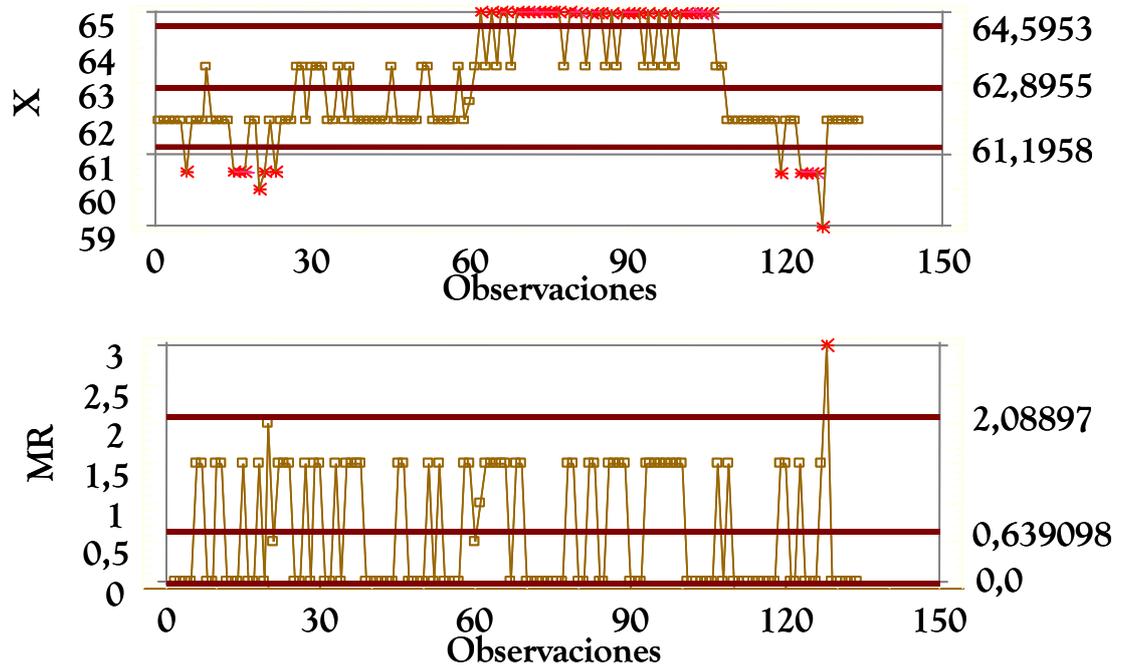
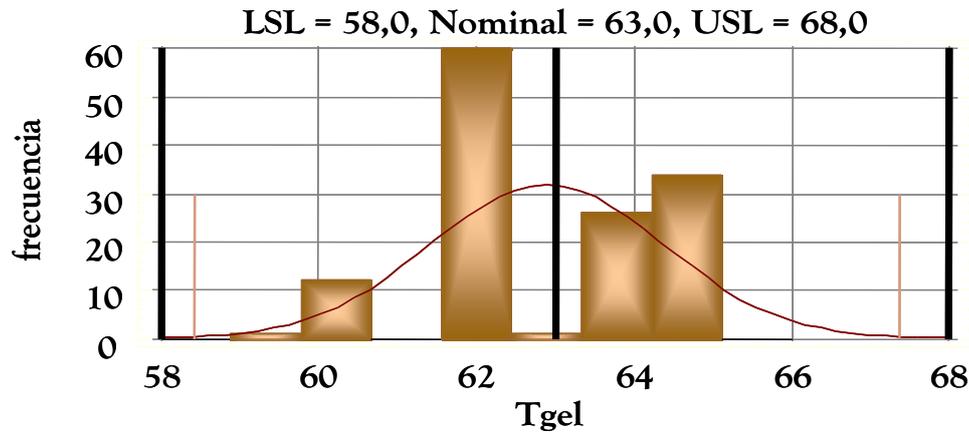


Figura 14. Gráfica de control de temperatura de gelatinización (°C) del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

La gráfica (ver Figura 15) permite mostrar las dificultades que se presentan en la práctica, se observa que hay muchos puntos alrededor de un mismo valor (62), lo cual puede deberse a la subjetividad del observador. Esta temperatura se determina en la gráfica de viscosidad obtenida en un viscógrafo.

A pesar de que la viscosidad depende de la temperatura a la cual ocurre el incremento de viscosidad (temperatura de gelatinización) (Leach, 1965; Osman, 1967; citados por Monserrat, 1986), no fue considerada esta característica de calidad para los experimentos porque como se observa en los gráficos anteriores la misma no es muy variable, se podría decir que es bastante constante.



$$C_p = 1,11902$$

$$C_{pk} = 1,09563 \quad C_{pk} \text{ (upper)} = 1,1424 \quad C_{pk} \text{ (lower)} = 1,09563$$

$$C_r = 0,893643 \quad C_{pm} = 1,11625 \quad K = -0,0208955$$

Figura 15. Histograma de temperatura de gelatinización (°C) del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

● *Variables del proceso de obtención de almidón de yuca modificado para el lapso comprendido de enero-2000 a enero-2001.*

1. **Viscosidad** (luego de la reacción de modificación): se observa en el **Gráfico de Control** (ver Figura 16) que hay 4 puntos fuera del límite de control superior, observándose además una moderada variabilidad de las observaciones.

El **Histograma** (ver Figura 17) presenta una distribución normal, pero con un pico aislado, debido probablemente a una anomalía en el proceso o bien un error de medición. Además expone que el proceso de fabricación no es capaz de mantener la viscosidad en un rango deseado (400 - 500 U.B). El promedio de 450,54 U.B coincide con al valor nominal. En cuanto a la variabilidad se puede observar que no es muy alta.

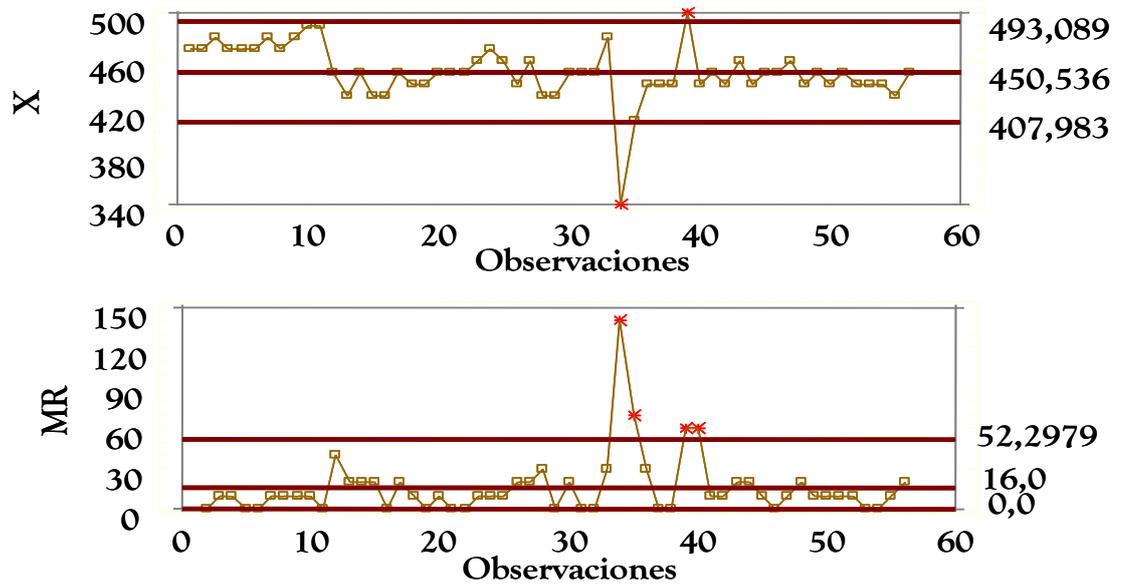


Figura 16: Gráficas de control de viscosidad (U.B) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Es de hacer notar que a esta variable se le aplicaron estas herramientas para observar su comportamiento únicamente, porque es una de las variables respuestas, ya que como se mencionó anteriormente de ella va a depender el tiempo de reacción, es decir, la reacción durará el tiempo necesario para alcanzar la viscosidad dentro de las especificaciones.

2. **Tiempo de reacción:** la **Gráfica de Control** (ver Figura 18) muestra 1 punto fuera del límite de control superior, de ello se interpreta que el tiempo de reacción del proceso de obtención de un almidón modificado químicamente está fuera de control, además de presentar una alta variabilidad, lo cual puede observarse en el gráfico de rango móvil y verificarse en el anexo A con el coeficiente de variación (24,74 %).

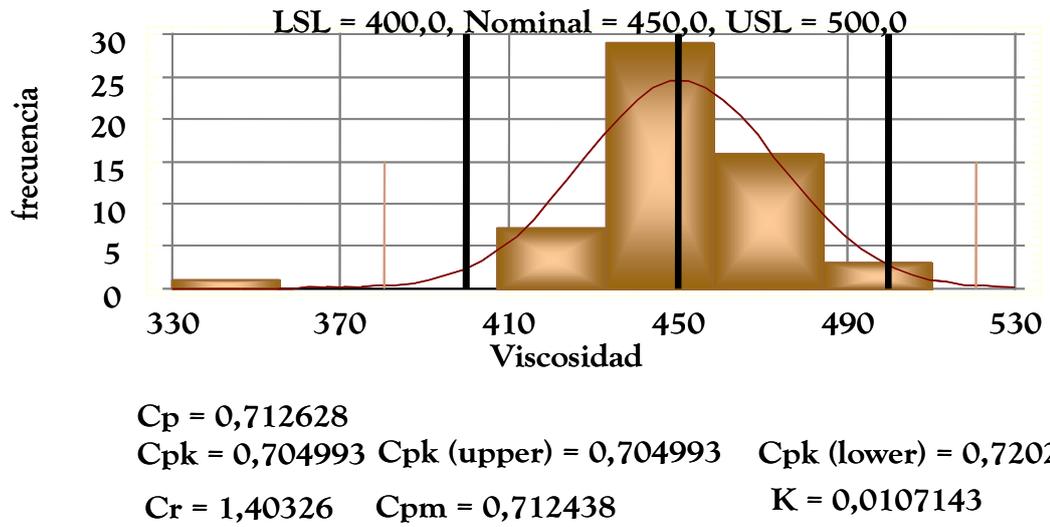


Figura 17: Histograma de viscosidad (U.B) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

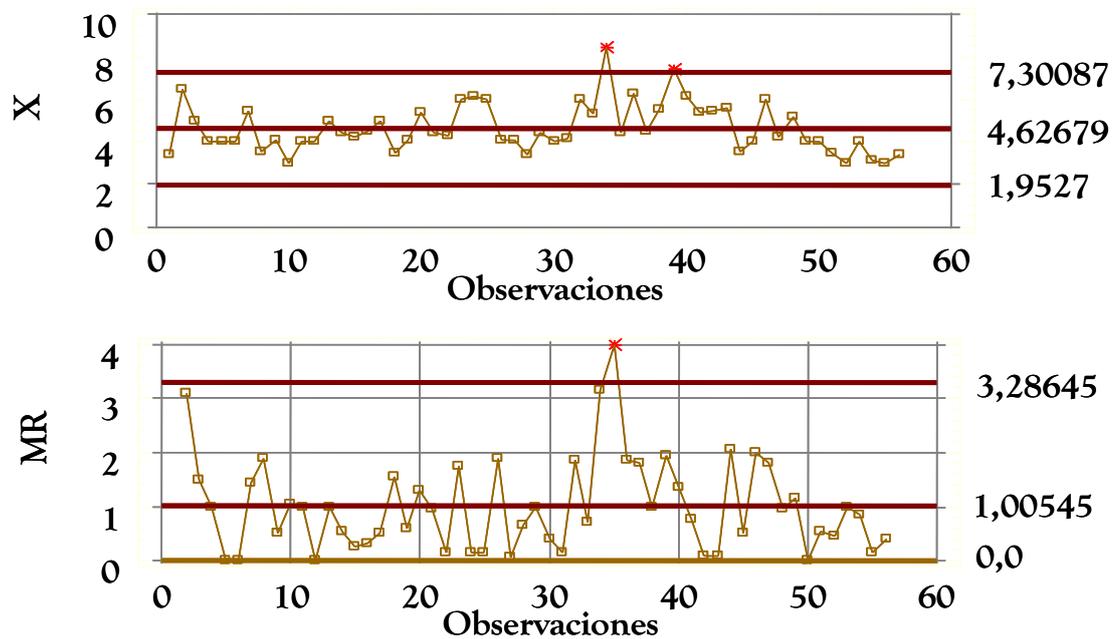


Figura 18: Gráficas de control de tiempo de reacción (h) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

En el **Histograma** (Ver Figura 19) se observa que no hay una distribución normal. La mayor frecuencia es entre 3,7 y 4,7 horas, coincidiendo con el promedio de 4,63 horas. Hay una alta variabilidad de los datos, que van de 3,0 a 8,45 horas.

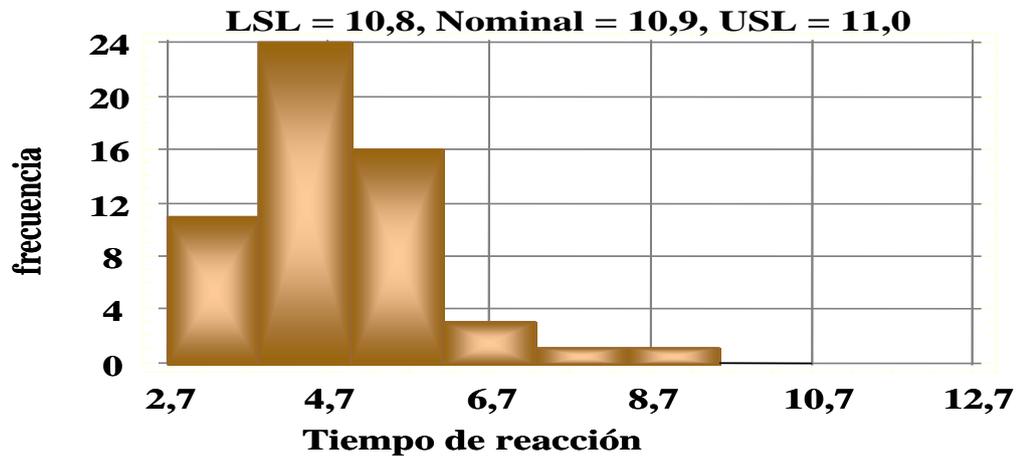


Figura 19: Histograma de tiempo de reacción (h) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Se realizó el **Diagrama de Dispersión** (ver Figura 20) para ver si existía asociación entre el tiempo de reacción y la viscosidad del proceso, del cual se obtuvo que no existe asociación lineal entre las variables ($r = -0,1510$; $p = 0,2667$ ns).

Cabe destacar, que al igual que la viscosidad, el tiempo de reacción es una variable respuesta; a la cual se le aplicaron las herramientas anteriores para observar su comportamiento.

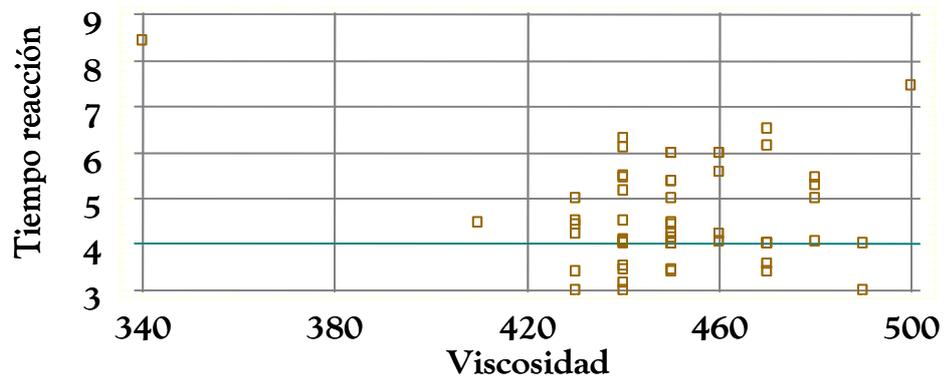


Figura 20: Diagrama de dispersión de tiempo de reacción (h) vs viscosidad (U.B) del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

3. **pH de la reacción** (al iniciar la reacción de modificación): se observa en la **Gráfica de Control** (ver Figura 21) de rango móvil, que la variable está fuera de control, por presentar un punto fuera del límite de control superior, a pesar de ser baja la variabilidad como se observa tanto en el gráfico como en el anexo A con el coeficiente de variación (0,47 %)

El **Histograma** (Ver Figura 22) muestra que hay una distribución normal de las observaciones. A pesar de que hay una baja variabilidad, existe un pico aislado. Por otro lado, el $C_p = 0,6524$ denota que el proceso no es capaz de cumplir con las especificaciones. El promedio (10,90) (ver Anexo A) coincide con el valor nominal (10,9), por lo que el proceso está centrado.

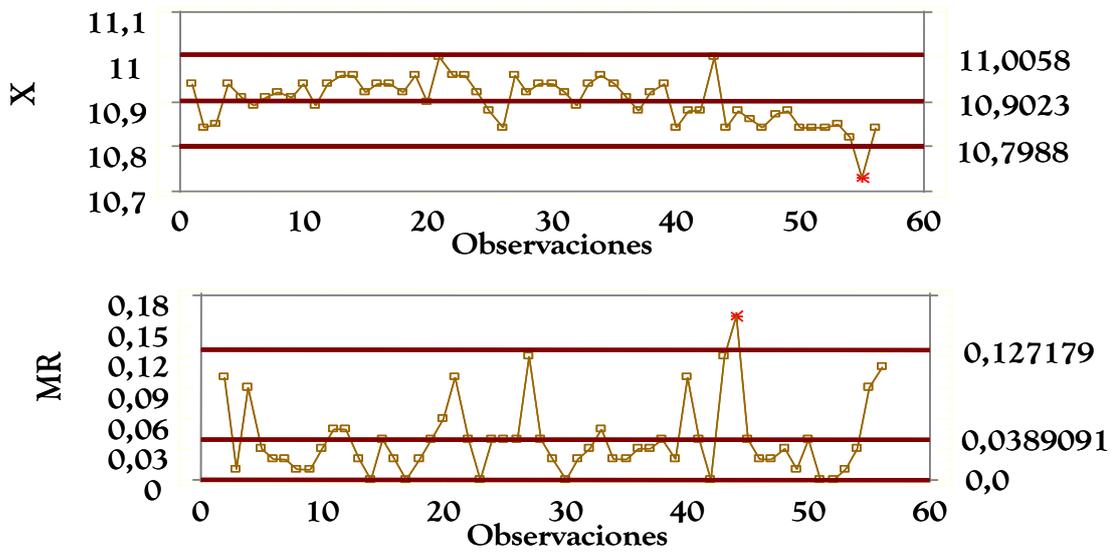
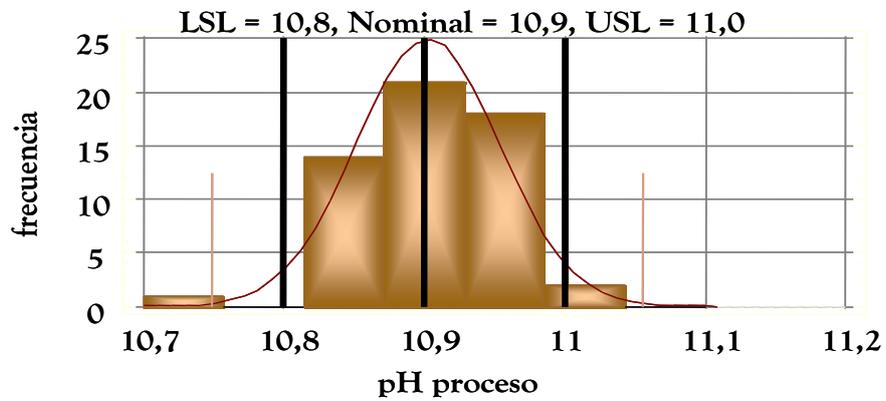


Figura 21: Gráficas de control de pH para la reacción de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)



$C_p = 0,652357$
 $C_{pk} = 0,637213$ $C_{pk} \text{ (upper)} = 0,637213$ $C_{pk} \text{ (lower)} = 0,667501$
 $Cr = 1,5329$ $C_{pm} = 0,651673$ $K = 0,0232143$

Figura 22: Histograma de pH para la reacción de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

En el **Diagrama de Dispersión** (ver Figura 23) entre el tiempo de reacción y el pH de reacción, se observa que no existe asociación lineal entre ambas ($r= 0,2260$; $p= 0,0940$). Sin embargo la probabilidad está cerca del nivel de significación de 0,05, lo cual indica que puede existir cierta asociación lineal positiva entre ambas variables.

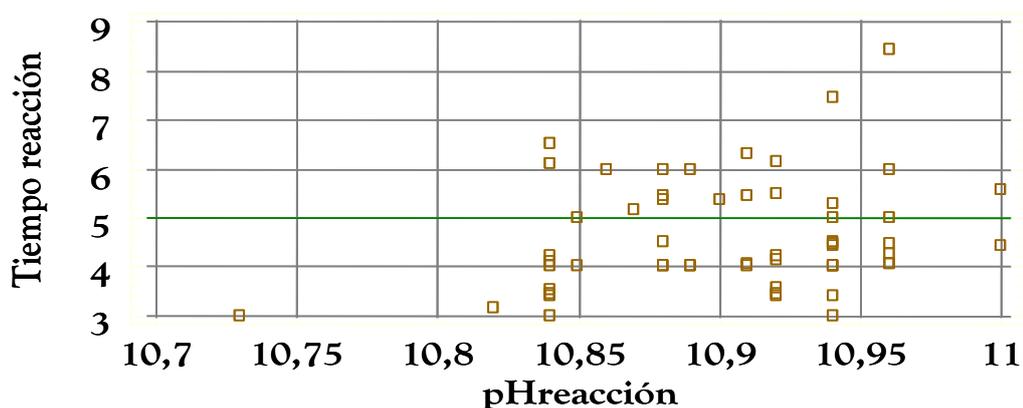


Figura 23: Diagrama de dispersión de tiempo de reacción (h) vs pH para la reacción de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Esta variable se incluyó porque el pH debe influir en el tiempo de reacción, ya que es una reacción química, y este pH es la base para el inicio de la reacción de modificación (para que actúen los reactivos catalizador y fosfato).

4. **Kg sustancia seca**: se observa en la **Gráfica de Control** de rango móvil (ver Figura 24) que hay 6 observaciones fuera del límite superior, por lo que la variable está fuera de control; observándose una moderada variabilidad.

Por otra parte, si se observa el **Histograma** (ver Figura 25) se puede notar que no hay una distribución normal. La mayor cantidad de suspensiones utilizadas en el proceso tenían entre 12000 y 13000 Kgss aproximadamente.

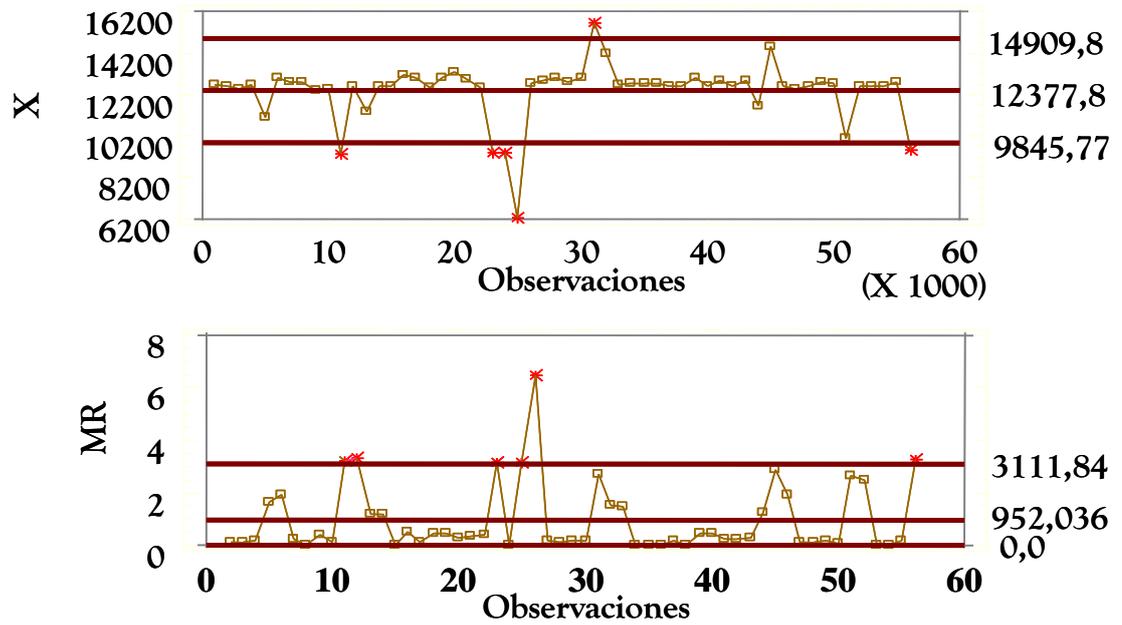


Figura 24: Gráficas de control de Kgss de la suspensión de almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

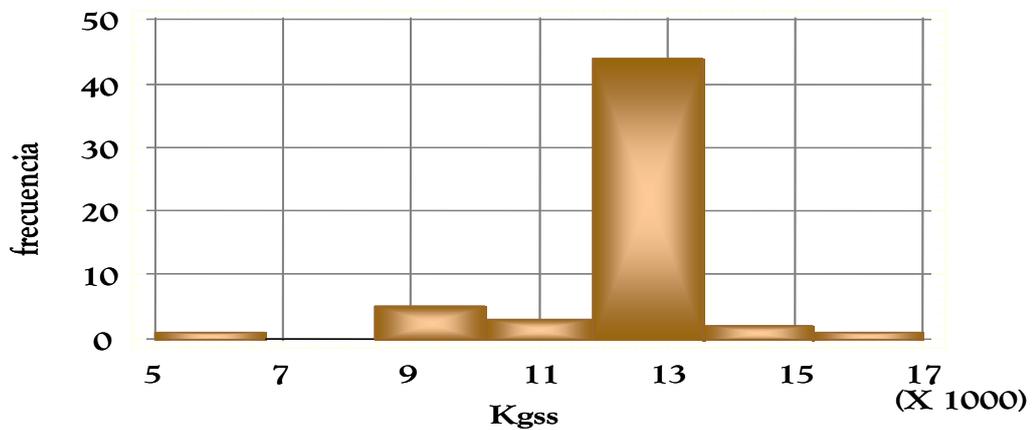


Figura 25: Histograma de Kgss de la suspensión de almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Se realizaron dos **Diagramas de Dispersión**, en la Figura 26 se observa que no hay asociación lineal entre las variables tiempo de reacción y Kgss ($r = -0,0803$; $p = 0,5563$ ns), por otro lado la Figura 27 muestra que no hay asociación lineal entre la viscosidad del proceso y los Kgss ($r = -0,1510$; $p = 0,2667$ ns).

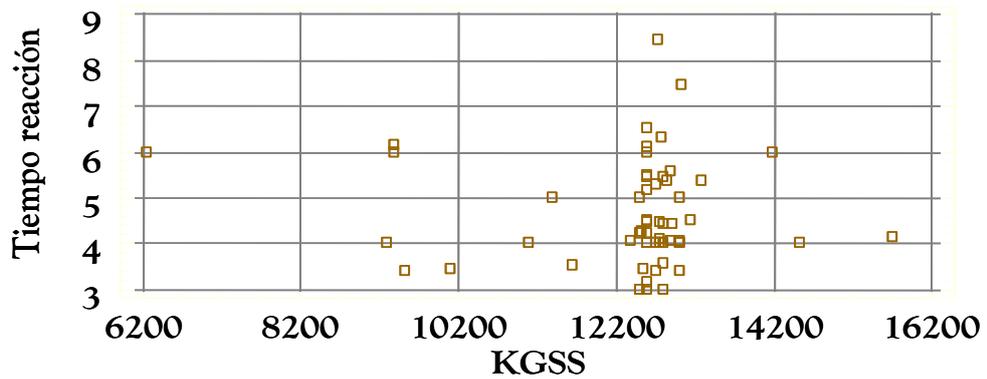


Figura 26: Diagrama de dispersión de tiempo de reacción (h) vs Kgss de la suspensión de almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

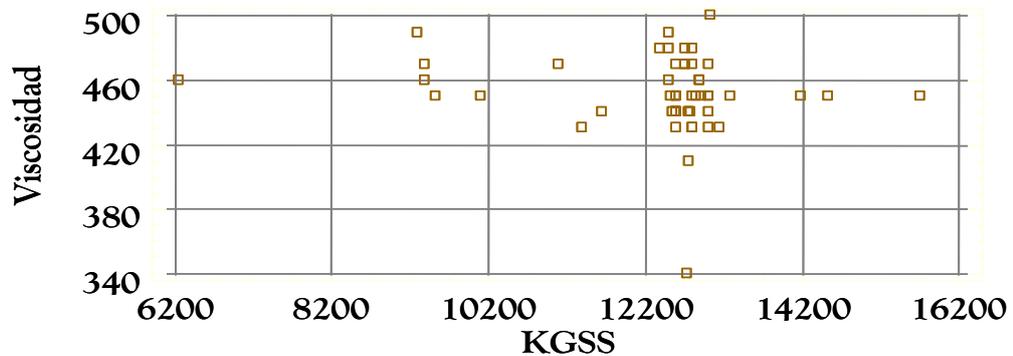


Figura 27: Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) vs Kgss de la suspensión de almidón del proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

No se tomó esta variable por considerar que no tenía o era muy poca su influencia sobre la viscosidad y el tiempo de reacción del proceso.

5. **Catalizador:** la Gráfica de Control (ver Figura 28) muestra que la variable está fuera de control; se presentan 5 datos por fuera del límite de control superior, además de la variabilidad de las observaciones presente (15,017 %, ver anexo A)

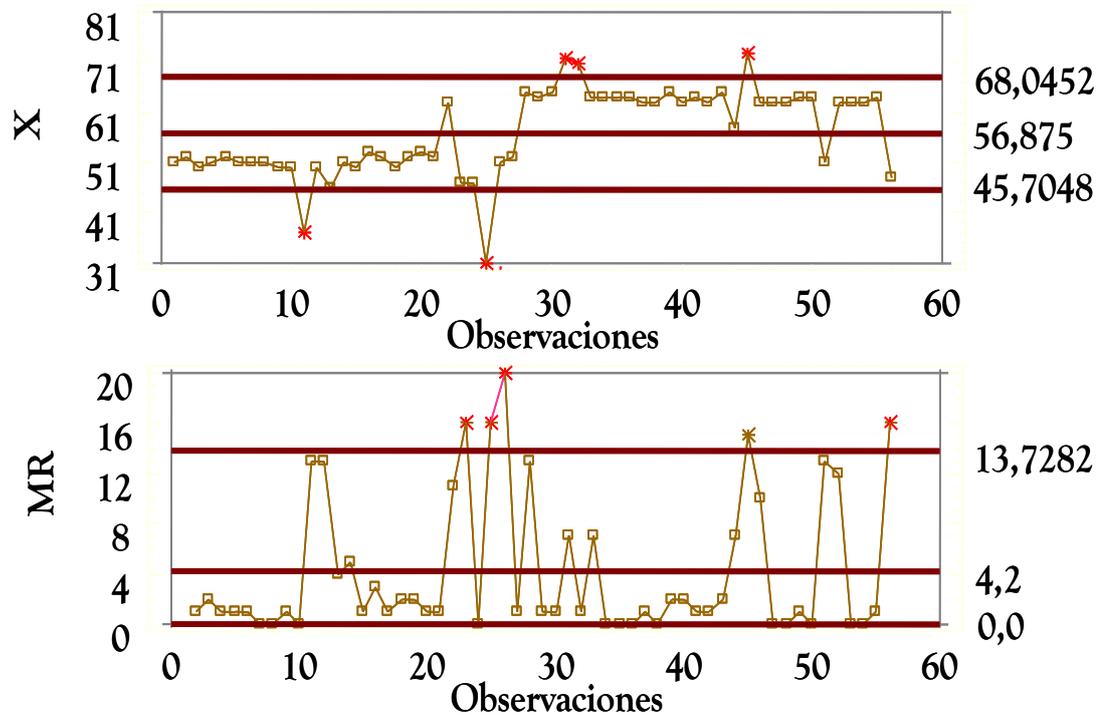


Figura 28: Gráficas de control de catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

En el **Histograma** (ver Figura 29) se observa que la mayor cantidad utilizada en proceso fue entre 48 y 58kg aproximadamente. Un promedio de 56,87 Kg (ver Anexo A), el cual coincide con la barra mas alta (mayor frecuencia), está centrado; pero con una alta variabilidad.

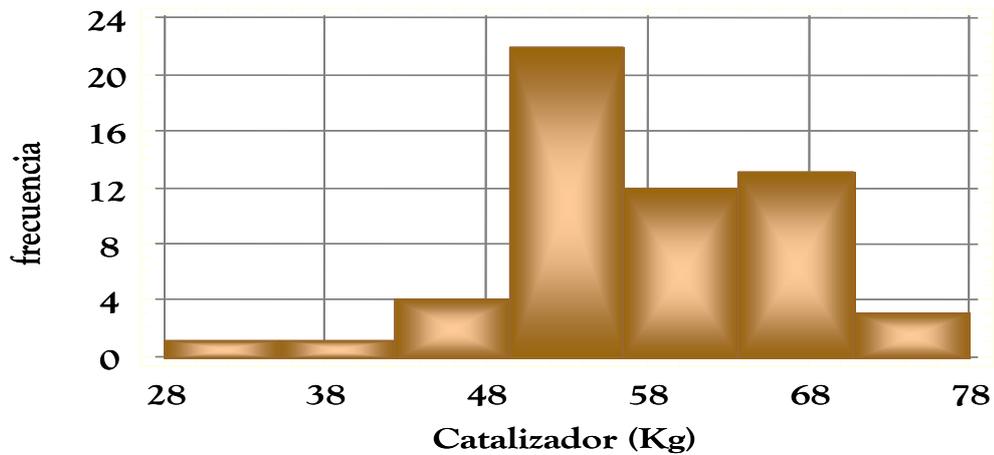


Figura 29: Histograma de catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Al igual que en la variable anterior, se efectuó dos **Diagramas de Dispersión**, en la Figura 30 se observa que no hay asociación lineal entre las variables tiempo de reacción y catalizador ($r= 0,0950$; $p= 0,4861$ ns).

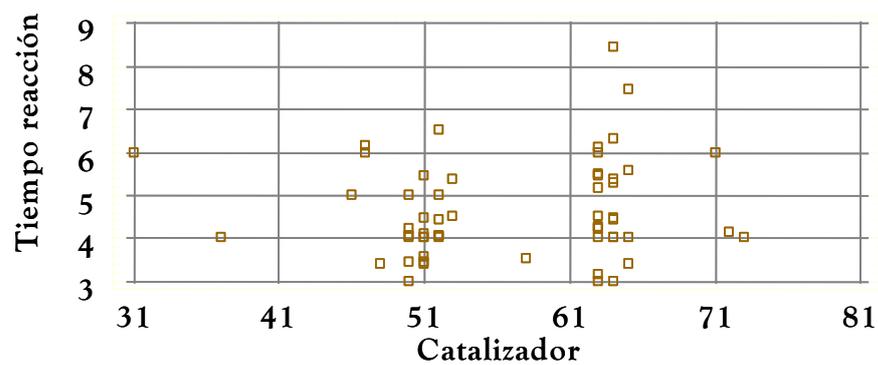


Figura 30: Diagrama de dispersión de tiempo de reacción (h) vs catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Por otro lado la Figura 31 muestra que hay una asociación lineal débil negativa entre la viscosidad del proceso y catalizador ($r = -0,3383$; $p = 0,0108$), es significativa la asociación.

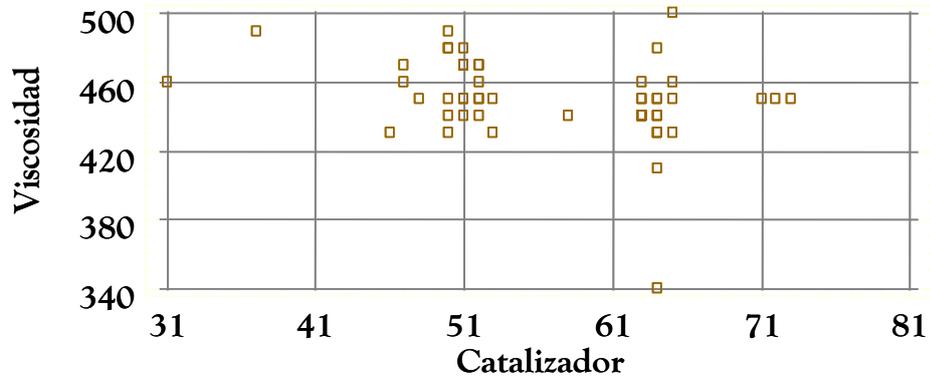


Figura 31: Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) del proceso vs catalizador (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

La velocidad de reacción aumenta con la presencia de un catalizador adecuado (Coúltate, 1998).

6. **Fosfato:** en la **Gráfica de Control** (ver Figura 32) se observa que hay 6 puntos que se salen del límite de control superior, por lo que esta variable está fuera de control estadístico, con una moderada variabilidad como se observa tanto en la gráfica como en el anexo A (CV= 11,21 %)

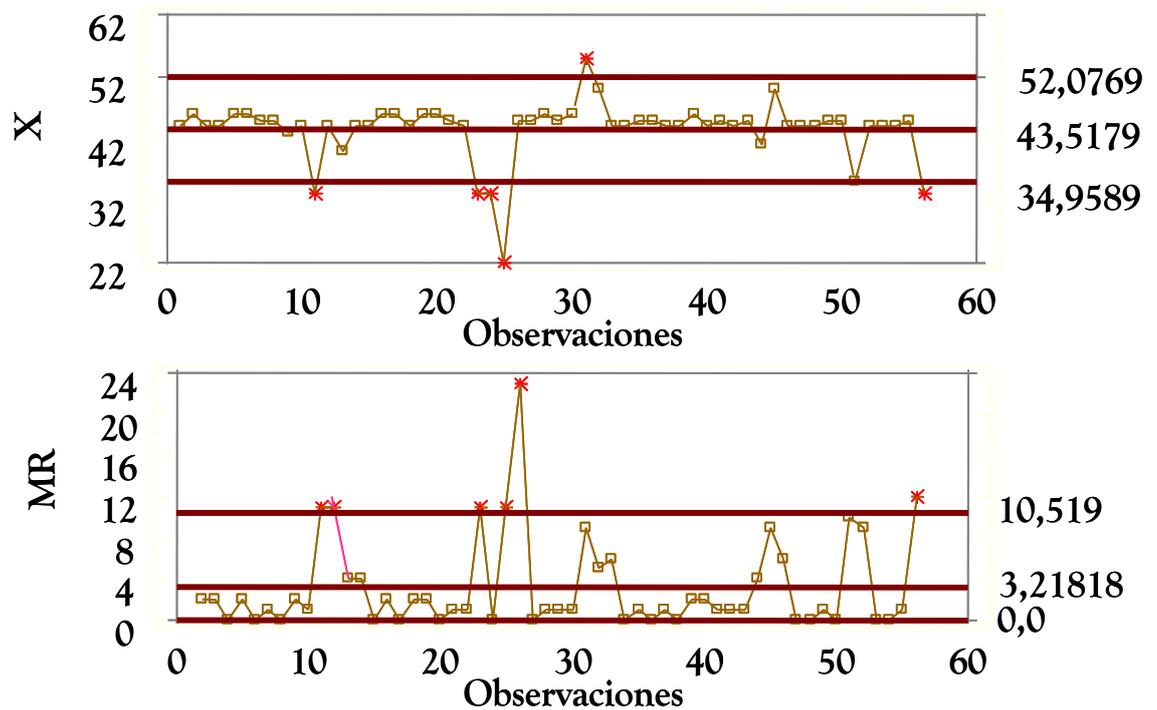


Figura 32: Gráficas de control de fosfato (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

El **Histograma** (ver Figura 33) muestra que no hay una distribución normal de las observaciones, un pico aislado, debido probablemente a una anomalía en el proceso o bien un error de medición. Una alta variabilidad de los datos, la mayor frecuencia está entre 42 - 48 Kg.

Se realizaron dos **Diagramas de Dispersión**, en la Figura 34 se observa que no hay asociación lineal entre las variables tiempo de reacción y fosfato ($r = -0,0879$; $p = 0,5196$ ns), por otro lado la Figura 35 muestra que no hay asociación lineal entre la viscosidad del proceso y fosfato ($r = -0,1300$; $p = 0,3396$ ns).

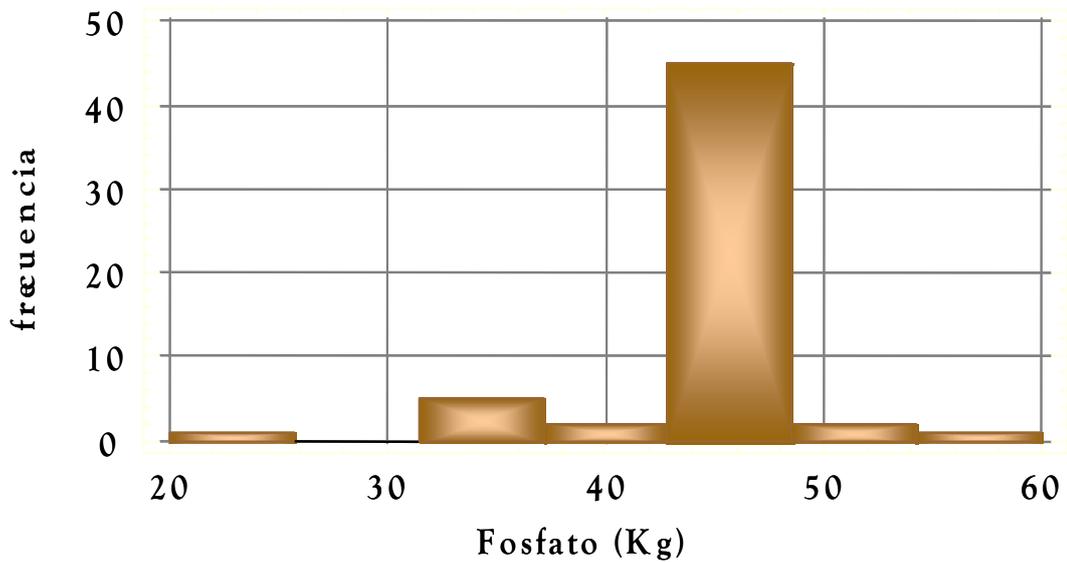


Figura 33: Histograma de Fósforo (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

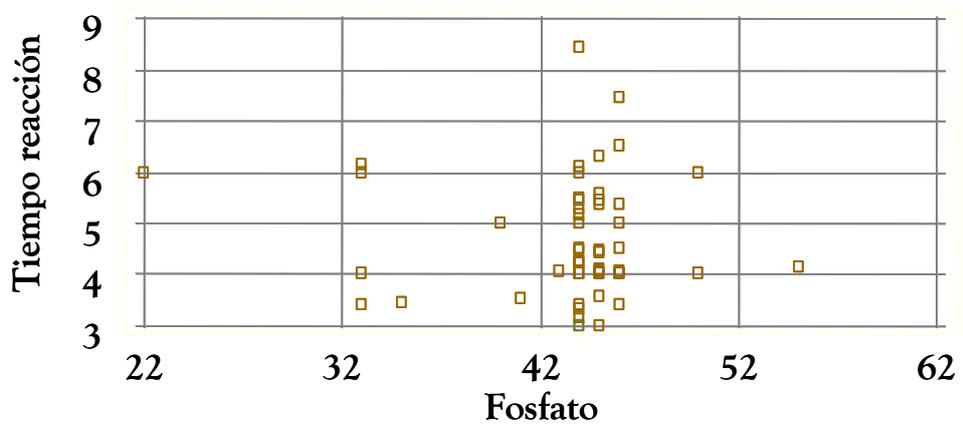


Figura 34: Diagrama de dispersión de tiempo de reacción (h) vs fósforo (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

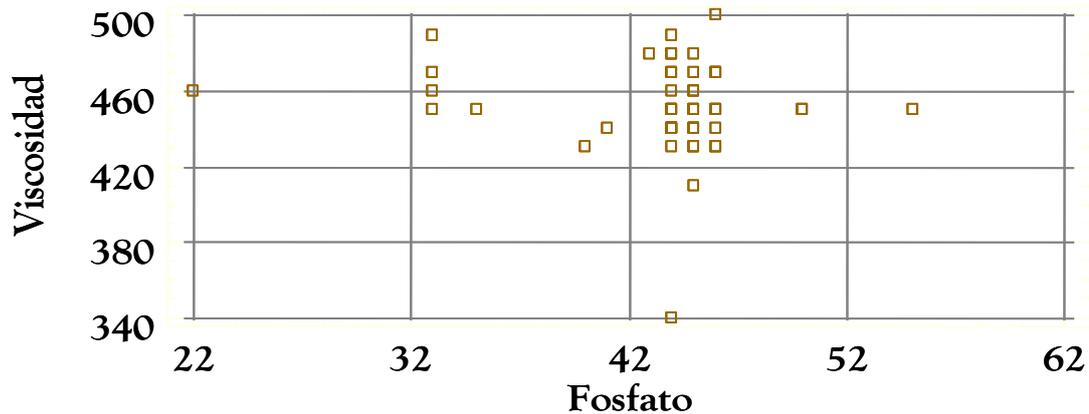


Figura 35: Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) vs fosfato (Kg) utilizado en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

Se incluyó en los experimentos esta variable porque el fosfato es el que va a modificar el almidón, entre las propiedades que modifican se encuentra la viscosidad del almidón.

7. $^{\circ}\text{Be}$: en las **Gráficas de Control** (ver Figura 36) a pesar de que no hay puntos fuera de los límites de control, se observa en la gráfica de individuos (X) una racha de 7 puntos consecutivos sobre el promedio y 6 puntos decreciendo; por lo tanto esta variable está fuera de control estadístico.

En el **Histograma** (ver Figura 37) se observa que no hay una distribución normal, el promedio $22,268^{\circ}\text{Be}$ (ver Anexo A) no coincide con la mayor frecuencia de datos (22,4 - 22,6), sin embargo hay una baja variabilidad de las observaciones.

El **Diagrama de Dispersión**(ver Figura 38) muestra que no existe asociación lineal entre las variables viscosidad del proceso y $^{\circ}\text{Be}$ ($r = -0,2433$; $p = 0,0708$). Sin embargo la probabilidad está cerca del nivel de significación de 0,05, lo cual indica que puede existir cierta asociación lineal negativa entre ambas variables.

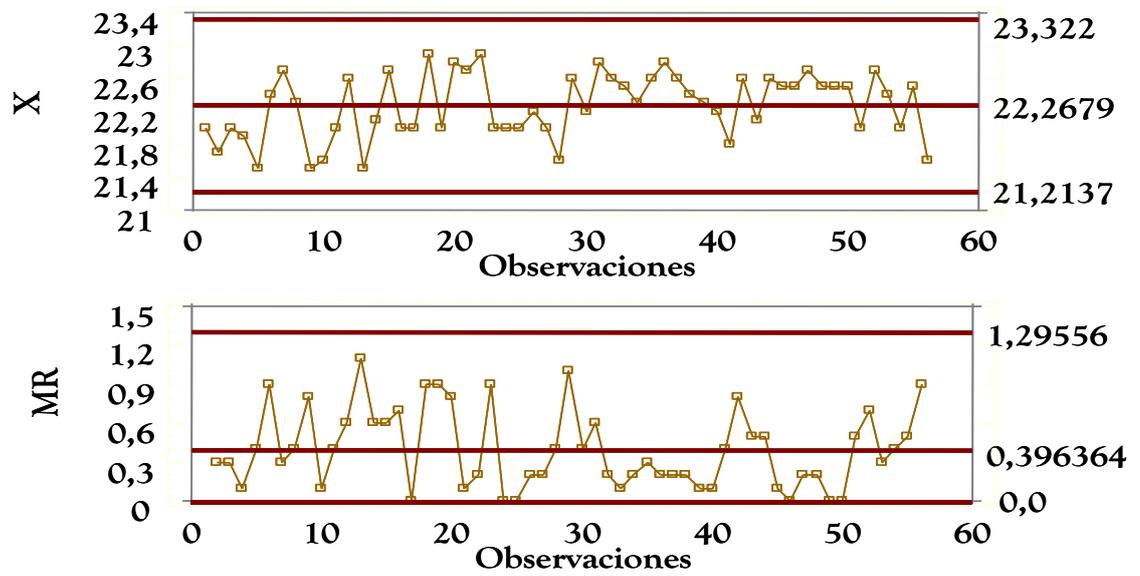


Figura 36: Gráficas de control de °Be de la suspensión utilizada en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

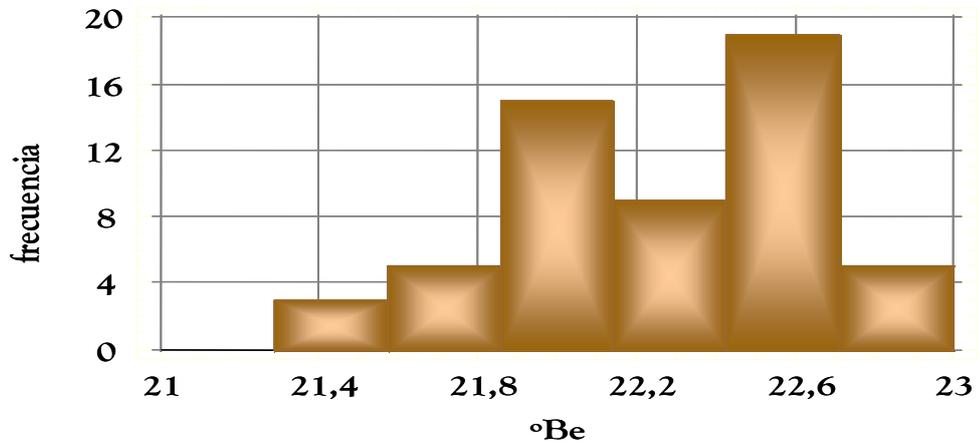


Figura 37: Histograma de °Be de la suspensión utilizada en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

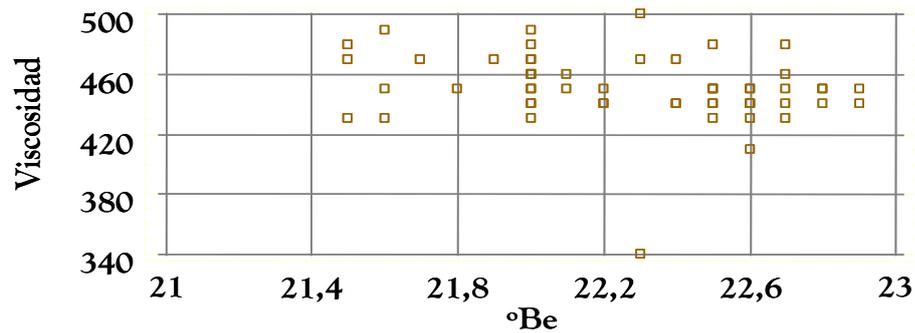


Figura 38: Diagrama de dispersión de viscosidad (U.B) de proceso vs °Be de la suspensión utilizada en el proceso de modificación del almidón regular de yuca (*Manihot esculenta*)

5.2.2 Ensayo preliminar

Una vez verificado el cumplimiento de los supuestos del análisis de varianza, se procedió a efectuar dicho procedimiento (ver Cuadro 1); donde se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de significación del 5 % entre los tratamientos aplicados (*pH* del almidón regular de yuca a tres niveles y *suspensión del almidón*, del mismo día y del día anterior al ensayo), además no es significativa la interacción entre los dos factores. Por lo tanto la no significación de los factores, indica que no influyen en la viscosidad del proceso. El coeficiente de variación presentó un valor relativamente bajo (5,98%), lo cual es un indicativo del acertado control de la variabilidad no pertinente en el experimento. Se obtendrá la misma viscosidad independientemente del *pH* o el día de la suspensión.

Esto no se esperaba ya que en un ensato realizado con papa, trigo y yuca (Ellis y col., 1998) se obtuvo que la viscosidad de las suspensiones de almidón está afectada por los cationes presentes en el agua del proceso; además durante las pasantías se observó que las soluciones dejadas de un día para otro tardaba más tiempo para obtener la viscosidad dentro del rango deseado.

Debido a la gran cantidad de características y variables a evaluar y al poco tiempo para la realización de los ensayos, se repitió 3 veces el experimento para la variable respuesta viscosidad, pero se obtuvo sólo una repetición para el tiempo de reacción; por ello no se pudo llevar a cabo el análisis de varianza para esta última variable.

Cuadro 1. Análisis de varianza para la variable viscosidad del proceso obtenido del ensayo preliminar

Fuente de Variación	Grados de libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrados Medios	F
pHalm. yuca (A)	2	477,778	238,889	0,33 ns
Disolución del almidón (B)	1	800,000	800,000	1,09 ns
A*B	2	3100,00	1550,00	2,12 ns
Error	12	8783,33	731,944	
Total	17	13161,10		

ns: indica que el factor o la interacción no es significativa para $\alpha = 0,05$

5.2.3 Ensayo final

Igualmente, se verificó el cumplimiento de los Supuestos del Análisis de Varianza, luego se realizó el análisis de varianza (ver Cuadro 2) para el diseño factorial fraccionado: Se obtuvo que la *viscosidad* del almidón regular de yuca (factor A) y el *pH* para llevar a cabo la reacción de modificación (factor D) son altamente significativos, es decir, influyen significativamente en el tiempo de reacción a un nivel de significación del 1 %; pero el catalizador (factor B) y el grupo fosfato (factor C) no influyeron en el tiempo de reacción.

Sin embargo el coeficiente de variación fue muy alto (33,89 %) lo cual puede indicar que hubo alguna fuente de variabilidad que no se controló. La viscosidad influye en el tiempo de reacción porque mientras más tiempo tarda el fosfato, para reducirla a los niveles adecuados.

Cuadro 2. Análisis de varianza obtenido del diseño factorial fraccionado

Fuente de Variación	Tiempo de reacción		Viscosidad	
	Grados de libertad	Probabilidad	Grados de libertad	Probabilidad
Viscosidad del almidón regular (A)	2	0,0002 **	2	0,0509 ns
Catalizador (B)	2	0,2063 ns	2	0,0169 *
Fosfato (C)	2	0,1164 ns	2	0,0853 ns
pH para la reacción de modificación (D)	2	0,0058 **	2	0,3722 ns
Error Experimental	18		18	
Total	26		26	

ns: indica que el factor o la interacción no es significativa para $\alpha = 0.05$

* : indica que el factor o la interacción es significativa para $\alpha = 0.05$

** : indica que el factor o la interacción es significativa para $\alpha = 0.01$

En cuanto a la variable respuesta viscosidad, sólo el catalizador (factor B) influyó significativamente sobre la misma; ya que este puede estarse aplicando en excesivas cantidades, por lo que compite con el almidón por el agua, afectando la viscosidad (disminuyéndola) lo cual se verifica con el diagrama de dispersión (ver Figura 33). El coeficiente de variación de 2,05 % señala que hay una baja variabilidad en los datos, por lo que hubo un acertado control de todas las variabilidades por parte del diseño.

En vista de que hubo diferencias estadísticas significativas entre los factores se procedió a realizar la prueba de medias de Duncan; y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para la variable respuesta tiempo de reacción (ver cuadro 3); la prueba de medias muestra que el nivel más alto y el intermedio del factor A (Viscosidad del almidón regular de yuca) son los más adecuados ya que producen un tiempo de reacción adecuado para el proceso (1,84 h y 1,46 h, para el alto e intermedio respectivamente), el nivel más bajo produjo un menor tiempo de reacción (72 min) que si se utiliza en el proceso se puede perder el lote de producto. En cuanto al factor D (pH para la reacción de modificación) el nivel más adecuado para el tiempo de reacción (1,82 h) es el bajo; el intermedio y alto forman un mismo grupo, es decir que no hay diferencias significativas entre ambos (ver Figura 39).

Cuadro 3. Prueba de rango múltiple de Duncan para el tiempo de reacción (h)

Factor	Niveles de tratamientos	t. reacción promedio (h)	Grupo de medias
A	3	1,84	A
	2	1,46	A
	1	0,72	B
B	1	1,82	A
	2	1,22	B
	3	1,06	B

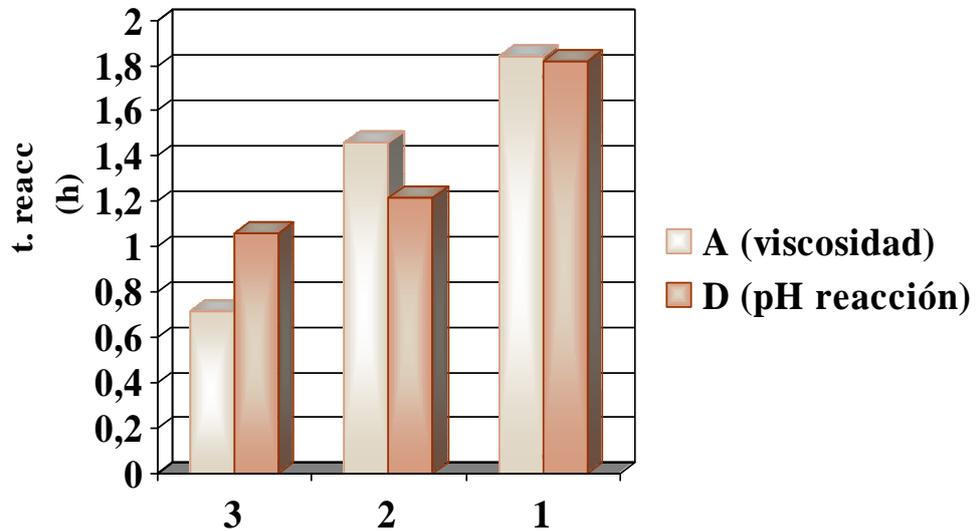


Figura 39. Gráfico de medias de Duncan para el tiempo de reacción obtenido con los niveles del factor A (viscosidad) y D (pH reacción)

- Para la viscosidad; la prueba de medias señala que el nivel más adecuado del factor B (Catalizador) para obtener un almidón con viscosidad de proceso cercana a 500 UB. es el nivel más alto (ver Cuadro 4 y Figura 40).

Cuadro 4. Prueba de rango múltiple de Duncan para la viscosidad (UB)

Factor	Niveles de tratamientos	Viscosidad (UB)	Grupo de medias
B	3	485,56	A
	2	475,56	B
	1	471,11	B

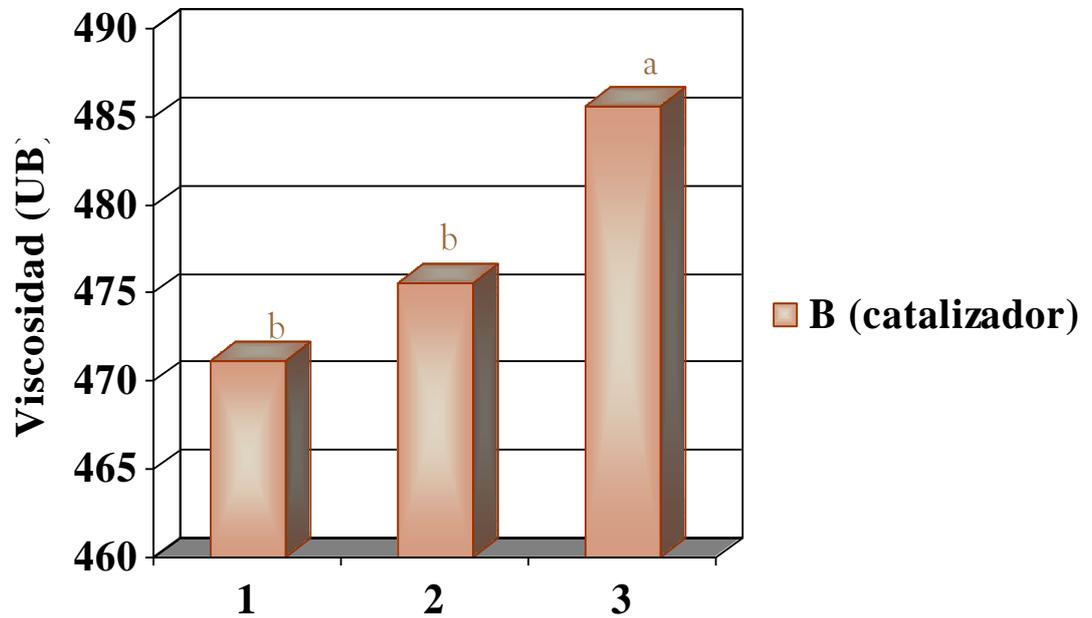


Figura 40. Gráfico de medias de Duncan para la viscosidad obtenida con los niveles del factor B (catalizador)

La proyección del ensayo factorial fraccionado, arrojó que todas las interacciones de primer orden eran no significativas, únicamente se verificó la influencia de los factores mencionados en párrafos anteriores.

VI. CONCLUSIONES

- Mediante el uso del diagrama de flujo estándar de la ANSI se logró visualizar y describir, cada una de las operaciones y/o etapas involucradas en el proceso de obtención a escala piloto de un almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado químicamente hasta su neutralización
- A través de las Gráficas de Control, se obtuvo que tanto las características de calidad de la materia prima, como las variables del proceso evaluadas, se encuentran fuera de control estadístico; no son predecibles.
- Los Histogramas realizados, señalaron que existe una gran variabilidad de las observaciones de las características de calidad y las variables del proceso.
- Mediante los Diagramas de Dispersión se determinó que la mayoría de las características de calidad o las variables no tienen asociación lineal entre sí. Sin embargo la viscosidad del almidón regular y la temperatura de gelatinización si presentan una asociación lineal positiva, el tiempo de reacción y el pH de reacción del proceso una leve asociación lineal positiva, la viscosidad del proceso se asocia lineal y negativamente con el catalizador.
- Tanto la viscosidad del almidón regular de yuca y el pH para la reacción influyen en el tiempo de reacción. Sin embargo, el coeficiente de variación (33,89%) indica que probablemente existió otra fuente de variabilidad que no se controló. Los niveles más adecuados son el nivel más alto y el intermedio de la viscosidad del almidón regular de yuca, ya que generan un tiempo de reacción para el proceso de 1,84 h y 1,46 h, respectivamente; y el bajo, para el pH de la reacción, el cual genera un tiempo de reacción de 1,86 h.

● Por otro lado, en cuanto a la viscosidad del proceso la variable que influye es el catalizador. En este caso el bajo coeficiente de variación (2,05%) señala que hubo un acertado control de las fuentes de variabilidad por parte del diseño. Se puede emplear cualquiera de los niveles ya que generan una viscosidad entre 475 UB y 485 UB .

VII. RECOMENDACIONES

- Ir al desarrollo de una política de calidad en la fuente, dado que la viscosidad de la materia prima es importante para el producto final.
- Analizar la variabilidad del proceso para reducirla y luego aplicar el control estadístico de procesos.
- Emplear en el proceso de fabricación del almidón de yuca modificado químicamente los niveles intermedio y alto de la viscosidad del almidón regular de yuca, el bajo del pH del proceso, del catalizador y del fosfato, con el fin de cumplir con sus funciones adecuadamente además de reducir costos.
- Tomar en cuenta para próximos experimentos la temperatura del proceso y evaluar un rango más amplio del catalizador, a fin de ubicar la cantidad adecuada, de esta manera se invertiría menos en el mismo pero cumpliendo su función de acelerar la reacción.
- Prestar mayor colaboración y atención a los trabajos realizados en planta por tesistas y/o pasantes; los mismos podrían ser de gran beneficio para el desarrollo de la empresa y universidades.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, I. 1993. Control Estadístico de procesos. *Calidad Total*. Año 1(2): 5-7.
- Badui D., S. 1997. *Química de los Alimentos*. México, Editorial Alhambra Mexicana, pág. 94-105.
- Belitz, H. y Grosch W. 1997. *Química de los Alimentos*. Segunda Edición. Zaragoza, Editorial Acribia, S.A. pág. 337-350.
- Besterfield, D. 1995. *Control de Calidad*. Traducido por Raul Bautista Gutiérrez. Cuarta Edición. México, pág. 34.
- Brownsell, V.; Griffith, C. y Jones E. 1993. *La Ciencia aplicada al estudio de los Alimentos*. México, Editorial Diana, pág 21-24.
- Chacín, F. 2000. *Diseño y Análisis de Experimentos I*. Universidad Central de Venezuela Vicerrectorado Académico. Venezuela, pág 21.
- Charley, H. 1998. *Tecnología de Alimentos; Procesos Químicos y Físicos en la preparación de Alimentos*. México, Editorial Limusa, S.A. pág. 165-187.
- Cochran, W. y Cox G. 1990. *Diseños Experimentales*. Segunda Edición en español. México, Editorial Trillas. pág. 279 - 301.
- Comité de Calidad Total. 1991. *Manual de Herramientas de Mejoramiento de la Calidad*. Traducción del Manual por O. Tymchuk. Alfonzo Rivas: Turmero. Tema 10 pág. 1.

- Coultate, T. 1998. Manual de Química y Bioquímica de los Alimentos. Segunda Edición. Zaragoza, Editorial Acribia, S.A. pág. 30-36.
- COVENIN-ISO 3534-2. 1995. Estadística, Vocabularios y Símbolos; Parte 2: Control Estadístico de la Calidad. Venezuela, pág. 15,16.
- COVENIN-ISO 9004.4. 1995. Gestión de la Calidad y elementos del sistema de la Calidad; Parte 4: Lineamientos para el Mejoramiento de la Calidad. Venezuela, pág. 1-23.
- Defloor, I.; Dehing, I. y Delcour, J. 1998 Physico-Chemical Properties of Cassava starch. *Starch / Staerke*. 50 (2/3): 58-64.
- Deming, E. 1989. Calidad, Productividad y Competitividad; La salida. Madrid.pág.241-250.
- Ellis, R. ; Cochrane P.; Dale, F.; Duffus C.; Andrew L.; Morrison I.; Prentice R.; Swanston y Tiller S. 1998. Starch Production and Industrial Use. *J. Set Food Agric* (77): 289-311.
- Fennema, O. 1993 Química de los Alimentos. Traducido por Bernabé S. Pérez y col. Zaragoza, Editorial Acribia, S.A. pág. 129-138.
- Garfield, F. 1993. Principios de Garantía de Calidad para Laboratorios Analíticos. Estados Unidos, pág. 20-24.
- Giallongo, A. 2000. Control Estadístico del Proceso de Envasado de Mayonesa en una línea de Producción de Alimentos. Tesis Grado Ingeniero Agrónomo. Maracay, Venezuela; Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, 89 pág.

- Gitlow, H. 1991. Planificando para la Calidad, la Productividad y una posición Competitiva. Traducido por Héctor G. Tejera. México, Ventura Ediciones S.A. de C.V. pág 9.
- Grant, E. y Leavenworth R. 1996. Control Estadístico de Calidad. Segunda Edición. México, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. pág. 157.
- Gutiérrez, M. 1992. Administrar para la Calidad; Conceptos Administrativos del Control Total de la Calidad. México, Editorial Limusa. pág. 260-263.
- Harrington, J. 1992. Mejoramiento de los Procesos de la Empresa. Traducido por Gloria E. Rosas L. y Marco A. Tiznado S. Colombia, Editorial McGraw - Hill Interamericana S.A. pág. 98-118.
- Hendrikx, P. 1999. Keep it simple with Tapioca. Food - Manufacture. 74 (10): 38-39.
- Ishikawa, K. 1986. ¿Qué es el Control Total de Calidad? La modalidad Japonesa. Traducido por David J. Lu. Colombia, Editorial Norma. pág. 191-193.
- Juran, J. y Gryna, F. 1993. Manual de Control de Calidad. Traducido por Josep M. Vllhonrat Bou. Cuarta Edición. Volmen II. España, McGraw - Hill / Interamericana de España S.A. pág. 23.3 - 26.7.
- Krül, J. 2001. Aditivos Alimentarios, [On-line]: <http://www.imsa.com.mx/glosario.htm>
- Khuel, R. 2001. Diseño de Experimentos. Principios Estadísticos de Diseño y Análisis de Investigación. Traducido por Marcia González Ozuna. 2ª Edición. México, Thomson Editores, S.A. de C.V. pág. 391,398.
- Kume, H. 1998. Herramientas Estadísticas básicas para el Mejoramiento de la Calidad. Traducido por Eloisa vasco. Colombia, Grupo Editorial Norma. pág. 61-119.

- MacDougall, A. 1999. Native vs. Modified Starch; The proof is in the pudding. *Food - Manufacture*. 74 (2): 16-18.
- Milton, S. 1994. *Estadísticas para la Biología y Ciencias de la salud*. Segunda Edición . España, Editorial McGraw - Hill - Interamericana. pág. 362, 363.
- Montaldo, A. 1979. *La Yuca o Mandioca; Cultivo, Industrialización, Aspectos Económicos, empleo en la Alimentación Animal, Mejoramiento*. Costa Rica, Editorial IICA. pág. 280,281.
- Montaña, R. 2000. *Uso del Análisis de Varianza aproximado en la interpretación de los Gráficos de Control*. Tesis Grado Ingeniero Agrónomo. Maracay, Venezuela; Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. pág. 15.
- Montgomery, D. 1991a. *Control Estadístico de la Calidad*. México, Grupo Editorial Iberoamerica S.A. de C.V. 447 p.
- Montgomery, D. 1991b. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Traducido por Jaime Delgado S. México, Grupo Editorial Iberoamerica S.A. de C.V. 447 p.
- Monserrat L., E. 1986. *Pregelatinización de harinas y almidón de yuca mediante tratamientos físicos con secadores de doble tambor y caracterización de sus propiedades físicas y químicas*. pág. 10-30.
- Monzón P., D. 1992. *Introducción al Diseño de Experimentos*. 3ª Edición. Universidad Central de Venezuela. Maracay - Venezuela. Alcance 34. pág. 41, 86.
- Norma Venezolana 4-1 65 COVENIN, Dirección de Industrias, Ministerio de Fomento. S/F. *Uso de Gráficos de Control Estadístico de la Calidad*. Venezuela: pág. 2-4.

- Pardio, S. y Waliszewki, K. 1994. Cassava Starch in the Food Industry. *Food Marketing & Technology*. 8 (2): 18-20.
- Pérez L., C. 1999. Control Estadístico de la Calidad. Teoría, Práctica y Aplicaciones Informáticas. México, Editorial Alfaomega ra-ma. pág. 79-383.
- Rocioli F., C. D. 1983. Caracterización Físico-Química de los almidones de yuca de ocumo criollo modificados mediante tratamientos físicos y químicos. Tesis Grado Ingeniero Agrónomo. Maracay, Venezuela; Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. 80 p.
- Steel, R. G. y Torrie, J. H. 1988. Bio Estadística: Principios y Procedimientos. Traducido por: Ricardo Martínez. Segunda Edición. México, Editorial Mc Graw - Hill. pág. 132-329.
- Tribus, M. 1989. Elaboración de Flujogramas de Despliegue. Publicado por Quality & Productivity.
- Wheeler, D. J. 1990. Understanding Industrial Experimentation. Second Edition. USA; Knoxville; SPC Press, Inc. pág. 56.
- Wong, D. W. 1995. Química de los Alimentos: Mecanismos y Teoría. Zaragoza, Editorial Acribia S.A. pág. 142,143.

VIII. ANEXOS

ANEXO A. Estadística Descriptiva de cada una de las características de calidad de la materia prima y las variables del proceso

	Obs.	Promedio	Desv. estándar	Coefficiente de Variación (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Visc. almidón regular (U.B)	134	750,71	49,672	6,6167	600	880
pH almidón regular	134	5,6	0,3611	6,4478	4,9	6,9
Temperatura de gelatinización (°C)	134	62,896	1,4894	2,3681	59	65
Viscosidad del proceso (U.B)	56	450,54	23,388	5,1911	340	500
Tiempo de reacción (h)	56	4,6268	1,1446	24,739	3	8,45
pH para reacción	56	10,902	0,0511	0,4687	10,73	11
Kgss	56	12378	1399	11,302	6264	15698
Catalizador (Kg)	56	56,875	8,5409	15,017	31	73
Fosfato (Kg)	56	43,518	4,8766	11,206	22	55
° Be	56	22,268	0,3932	1,656	21,5	22,9