

# CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LA YUCA (*MANIHOT ESCULENTA CRANTZ*) PARTE I: RESPUESTA A LA COMPRESIÓN UNIDIRECCIONAL

## RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE CASSAVA ROOT (*MANIHOT ESCULENTA CRANTZ*) PART ONE: RESPONSE TO UNIDIRECTIONAL COMPRESSION.

HECTOR JOSÉ CIRO VELÁSQUEZ

*Profesor. Universidad Nacional de Colombia- Medellín, hjciro@unal.edu.co*

STEBAN LARGO AVILA

*Ingeniero Agrícola. elargo@unalmed.edu.co*

HAMED SANTIAGO CASAFÚS PIEDRAHITA

*Ingeniero Agrícola. hscasafu@unalmed.edu.co*

Recibido para revisar 19 de Septiembre de 2005, aceptado 10 de Octubre de 2005, versión final 11 de Septiembre de 2006

**RESUMEN:** Se presentan los resultados de una investigación experimental del comportamiento reológico de los productos agrícolas a través de la determinación y análisis de las curvas de flujo de la yuca (*Manihot esculenta crantz*) variedad chiroza obtenidas en compresión unidireccional. Las propiedades reológicas evaluadas fueron la resistencia mecánica del producto hasta el punto de falla (esfuerzo y deformación unitaria), tenacidad y módulo de deformabilidad. Los tubérculos fueron sometidos a pruebas de compresión unidireccional hasta la fractura a una velocidad de deformación de 1 mm/s, condiciones de temperatura y humedad relativa de 21°C y 65% respectivamente. Los ensayo reológicos fueron evaluados en dos sentidos de carga de acuerdo a las fibras (longitudinal y transversal) y dos niveles de contenido de humedad (producto fresco y producto deshidratado).

Los análisis estadísticos mostraron que el comportamiento reológico del producto depende del contenido de humedad del producto y el sentido de carga, indicando que el material vegetal presenta una resistencia mecánica a la falla (esfuerzo de falla) y tenacidad mas alta en sentido longitudinal que transversal. Además la rigidez del producto expresada por el modulo de deformabilidad indica que el producto es menos rígido a medida que se disminuye el contenido de humedad del producto.

**PALABRAS CLAVE:** Yuca, reología, Prueba de compresión, Propiedades mecánicas, Módulo de deformabilidad.

**ABSTRACT:** The results of the behavior of agricultural products through the determination and analysis of the flow curves of the Cassava (*Manihot esculenta crantz*) chiroza variety subjected to unidirectional compression are given in this experimental research. The rheological properties such as failure stress, strain until the rupture, toughness and deformability modulus were determined. The cassava samples were subjected to unidirectional compression until the point failure under a constant deformation rate of 1 mm/s and environmental conditions of temperature and relative humidity of 21°C y 65%, respectively. The rheological tests were evaluated in two loading senses according to the fiber direction of the material (longitudinal and transversal) and two moisture contents levels (raw and dried product).

The statistical analyses showed that the rheological behavior of the product depends on the moisture content and the loading direction, indicating that the vegetal material offers a mechanical resistance to the failure ( fracture stress) and toughness or energy density higher in sense longitudinal than transversal. In addition the rigidity to the product expressed by its module of deformability indicates that the product is less rigid as the moisture content of the product diminishes.

**KEYWORDS:** Cassava, Rheology, Compression test, Mechanical properties, Deformability modulus.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la yuca es un cultivo típico de economía campesina, presentando un promedio de área sembrada por finca que oscila entre una y cinco hectáreas, una oferta atomizada, sistemas de producción atrasados, baja tendencia a la modernización del cultivo y mínimos índices de agroindustrialización. La producción mundial de yuca a 2001 se ubica en 181 millones de toneladas, según el Observatorio Agrocadenas, adscrito al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el mismo ente sitúa como principal productor del mundo a Nigeria con 32,6 millones de toneladas y en segundo lugar a Brasil con 22,5 millones de toneladas en el mismo año. Además de acuerdo al Ministerio de Agricultura, el consumo por persona mundial a 2001 es de 29 kg/año, con una tasa de crecimiento en el mismo consumo desde 1997-2001 de 1,7 %. En lo que se refiere a consumo per cápita en Colombia a 2001 es de 46 kg/año con una tasa de crecimiento consumo Colombia 1997-2001 de 3,2 %.

La Yuca (*Manihot esculenta Crantz*), también conocida como Mandioca o Casava, es un arbusto originario de Sudamérica y difundido en la actualidad en zonas tropicales de alrededor de 90 países de América, Asia y África; existen diversas opiniones acerca del lugar de origen. La Yuca (*Manihot Esculenta Crantz*), se cree fue domesticada inicialmente en Brasil; es allí donde existen el mayor número de producción y diversidad dentro de las diversas especies (Cock, 1989).

Según Ceballos y De la Cruz (2002), es un arbusto leñoso perenne que se cultiva comercialmente sembrando estacas de la parte más leñosa del tallo, donde las raíces engrosadas almacenan principalmente almidones. Es un cultivo que se considera rústico y de amplia adaptación a una gama de suelos, climas, además de soportar largos períodos de sequía. Se siembra en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1700 m, temperatura promedio de 24 °C y humedad relativa cercana al 72%. Existen especies amargas y dulces, siendo ésta última principalmente de uso en la alimentación humana y animal

A nivel estructural Domínguez et al. (1983), considera que la raíz de la yuca se compone de tres tejidos principales: periderma (cáscara), el parénquima cortical (corteza) y el parénquima interior, en la cual, el 80% del peso fresco de la raíz, aproximadamente, corresponde al parénquima o pulpa, que es el tejido en que la planta almacena el almidón, el contenido de materia seca de la raíz de yuca fluctúa entre el 30% y el 40%, la materia seca del parénquima está constituida, en su mayor parte (90% a 95%), por la fracción no nitrogenada, es decir, por carbohidratos (almidón y azúcares), el resto de esta materia seca corresponde a fibra (1% a 2%), grasas (0,5% a 1,0%), cenizas o minerales (1,5% a 2,5%) y proteína (2,0%) y el almidón representa, además, la mayor parte de los carbohidratos (96%) y es, por tanto, el principal componente de la materia seca de la raíz.

De acuerdo a Dobraszczyk y Morgenstern (2003), la reología es el estudio de la deformación y flujo de los materiales donde las medidas reológicas son establecidas para obtener una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas de los materiales, adquirir información de la estructura molecular y composición estructural, además de caracterizar y simular el comportamiento del material durante el procesamiento y control de calidad. Los estudios de naturaleza reológica en la industria alimentaria se concentran en el área de transición sólido-líquido, para lo cual el alimento es considerado un material de ingeniería de estructura compleja (Tabilo y Barbosa, 2003)

Las propiedades reológicas de los productos vegetales constituyen aspectos importantes de calidad, especialmente en tubérculos de difícil almacenamiento y de corta vida de anaquel. Entre esas propiedades están el peso y el tiempo que podrían soportar antes de llegar a sus límites de elasticidad, de deformación plástica, o de resistencia mecánica en sus diferentes estados de madurez (Mohsenin, 1986 y Stroshine, 1999), así como el grado de deformación cuando la raíz es arrancada de diferentes maneras y en diversos tipos de suelos, todo ello con la finalidad de conocer la resistencia del producto radicular al daño mecánico y de esta manera mejorar su manejo poscosecha (Chávez y Franco, 1996).

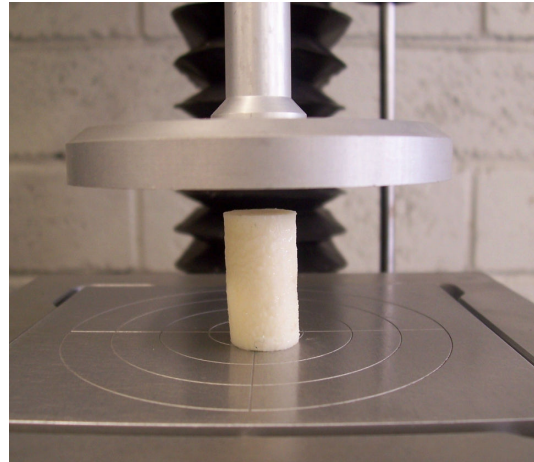
Actualmente en Colombia existe un escaso conocimiento del comportamiento reológico de los productos agrícolas que permitan optimizar y desarrollar nuevas técnicas de procesamiento, transformación agroindustrial y manejo de poscosecha (recolección mecanizada, transporte, empaque, clasificación, control de daño mecánico, etc), por lo que se hace necesario estudiar las características reológicas de estos productos bioingenieriles con la meta de que esta información contribuya a mejorar su calidad y presentación aumentando el valor agregado del producto.

El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar algunas características reológicas del tubérculo de la raíz de Yuca bajo ensayos de compresión unidireccional tales como esfuerzo y deformación unitaria al punto de falla, tenacidad y módulo de deformabilidad usando una velocidad de deformación constante de 1 mm/s.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en las siguientes fases:

**Fase I: Evaluación reológica.** Probetas cilíndricas de diámetro 14 mm y altura 20 mm provenientes de tubérculos de Yuca fueron sometidas a ensayos de compresión unidireccional usando un Analizador de Textura TA-XT 2i con una velocidad de deformación de 1 mm/s hasta su punto falla, como lo indica la Figura 1. Las probetas cilíndricas fueron obtenidas según dos direcciones de carga: en forma transversal y perpendicular a la dirección de las fibras del producto vegetal. Inicialmente a los tubérculos frescos seleccionados como material de ensayo se les determinó su contenido de humedad usando la metodología dada en la norma S358.2 dada por ASAE (1990). Los valores indicaron un contenido de humedad en base húmeda de 60,76% b.h  $\pm$  2%b.h, para el producto fresco.



**Figura 1.** Prueba de compresión unidireccional realizada a tubérculo de yuca.

**Figure 1.** Unidirectional compression test to the cassava root.

Con el objetivo de analizar el posible efecto del contenido de humedad en la respuesta reológica del tubérculo de Yuca, el material fresco fue deshidratado en un horno a convección forzada durante 4 horas a 105°C. Una vez finalizado el proceso de secado, del material vegetal fueron obtenidas muestras cilíndricas en dos sentidos de carga: longitudinal y transversal con respecto a la dirección de las fibras. El valor del contenido de humedad del producto deshidratado fue obtenido mediante la norma S358.2 dada por ASAE (1990) indicando un valor promedio de 25,37%  $\pm$  2,2% b.h.

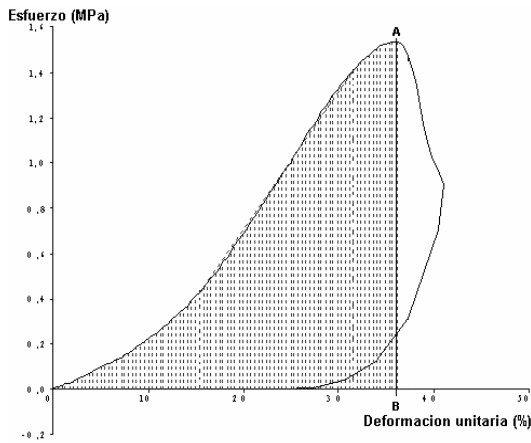
Con el software Texture Expert Exceed, versión 2.64, tanto para el producto en estado fresco como para el producto deshidratado, de la curva de flujo del material a compresión unidireccional fueron obtenidas las siguientes propiedades reológicas del producto:

- Valor del esfuerzo a la falla (MPa). Para cada ensayo fue determinado mediante la información grafica esfuerzo-deformación unitaria. Esta variable fue definida como el punto (A) donde existió una caída brusca del esfuerzo con un considerable aumento de la deformación unitaria del producto (Figura 2).

- Deformación unitaria en la falla (m/m). Fue obtenida como la deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de ruptura, punto B (Figura 2).
- Tenacidad (MJ/m<sup>3</sup>). Se determinó mediante una integración numérica método trapezoidal en función del esfuerzo real ( $\sigma_v$ ) y deformación unitaria real ( $\varepsilon_v$ ) de la forma:

$$U = \sum_{i=0}^n \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2} * (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad [1]$$

- Módulo de deformabilidad (MPa). Para las diferentes curvas de esfuerzo verdadero-deformación unitaria nominales o de ingeniería, se obtuvo mediante una regresión lineal hasta el punto de falla, como la pendiente de la línea recta asumiendo sólido de Hooke.



**Figura 2.** Curva característica de falla obtenida en el analizador de textura.

**Figure 2.** Typical fracture test to the cassava root obtained using the analyzer texture.

Las curvas de flujo del material a esfuerzos normales de compresión unidireccional fueron determinadas en términos de componentes reales de esfuerzo versus deformación unitaria así:

Para la deformación real ( $\varepsilon_v$ ):

$$\varepsilon_v = Ln \frac{H_0}{H_0 - \Delta H} = -Ln(1 - \varepsilon_{ing}) \quad [2]$$

Donde:

$H_0$  = Longitud inicial del espécimen (m)

$\Delta H$  = Deformación absoluta (m)

$\varepsilon_{ing}$  = Deformación unitaria de ingeniería (m/m)

Para el esfuerzo real ( $\sigma_v$ ):

$$\sigma_v = \sigma_{ing} (\varepsilon_{ing} + 1) \quad [3]$$

Donde  $\sigma_{ing}$  = Esfuerzo de ingeniería (Pa). Las expresiones [2] y [3] constituyen el modelo básico de Hencky para esfuerzos normales a compresión y tensión. También son conocidas como naturales o logarítmicas.

En términos de ingeniería la deformación unitaria y esfuerzo están dados por:

$$\varepsilon_{ing} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad [4]$$

$$\sigma_{ing} = \frac{F}{A_0} \quad [5]$$

En esta última expresión F es la fuerza de compresión aplicada al material (Newtons) y  $A_0$  es el área inicial transversal del elemento en m<sup>2</sup>. Las expresiones [4] y [5] son también conocidas como nominales.

Los módulos de deformabilidad ( $E$ ) del material fueron determinados de la respectiva curva de flujo, asumiendo sólido Hookeano de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [6]$$

**Fase II: Análisis estadístico.** Los resultados fueron analizados con el programa estadístico statgraphics plus versión 5,1 mediante pruebas de análisis de varianza y prueba de diferenciación de promedios a través de Pruebas Duncan e intervalos de diferenciación mínima significativa a un nivel de significancia del 5%.

Cada propiedad reológica (esfuerzo verdadero de falla, deformación unitaria a la falla, tenacidad y módulo de deformabilidad) fueron analizadas mediante un modelo de dos factores, efectos

fijos completamente aleatorio. El arreglo factorial empleado fue de (2x2) con siete repeticiones:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad [7]$$

$$i = 1,2; \quad j = 1,2; \quad k = 1,2,3,\dots,7$$

Donde:

$\alpha$  = El efecto del factor dirección de fuerza (transversal, longitudinal).

$\beta$  = El efecto del factor porcentaje de humedad (producto fresco, producto deshidratado)

$(\alpha\beta)_{ij}$  = El efecto de la interacción de los factores: dirección de carga y contenido de humedad.

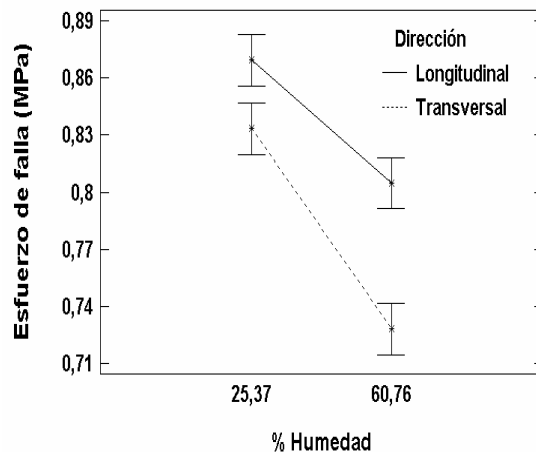
### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

**Esfuerzo real a la falla.** La Tabla 1 muestra el análisis de varianza, el cual indica que la dirección de carga (longitudinal y transversal), el contenido de humedad del material y su interacción es significativa al 5% ( $P < 0,05$ ). El coeficiente de determinación para el modelo del ANOVA fue de  $R^2$  (0,8394) y el valor de la prueba de Durbin Watson es 2,4082 indicando homogeneidad en la data estadística.

**Tabla 1.** Análisis de varianza (ANOVA) para el esfuerzo real a la falla.  
**Table 1.** ANOVA of the true stress to fracture point.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	PR > F
Humedad	1	0,0505459	0,0505459	83,94	< 0,0001
Dirección de fuerza	1	0,0221382	0,0221382	36,76	< 0,0001
Humedad*Dirección	1	0,00289752	0,00289752	4,81	0,0382
Error	24	0,0144526	0,000602192		
Total	27	0,0900343			

En la Figura 3 se muestran mediante un análisis de intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) a un nivel de significancia del 5% el efecto de la dirección de carga y contenido de humedad del producto en la resistencia mecánica del material a compresión unidireccional, indicando que tubérculo de Yuca resiste mas en sentido longitudinal (dirección de carga paralela a las fibras del producto) en comparación con la carga transversal (perpendicular a las fibras del material) mostrando que el producto exhibe un comportamiento anisotrópico posiblemente debido a su heterogeneidad estructural.



**Figura 3.** Esfuerzo de falla verdadero promedio.  
**Figure 3.** Mean values of the fracture true stress.

Con respecto al contenido de humedad se observa de la Figura 3 que para un sentido de carga fijo la resistencia mecánica del producto a esfuerzos de compresión es significativamente superior a medida que se disminuye el contenido de humedad. Esto puede ser explicado por el hecho que a medida que se evapora agua del producto se aumenta la fricción interna y con ello la resistencia mecánica del producto. Este comportamiento también puede ser explicado por el proceso de retrogradación de los almidones (amilasa y amilopectina) consecuencia del tratamiento térmico que sufrió el producto durante el proceso de secado. A su vez Daniel y Whistler (1985), Taub y Singh (1997), Baudi (1999) y Xie et al. (2004)

consideran que si se calienta una solución de concentrada de almidones y se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente, en el proceso de retrogradación se forma un gel rígido que envuelve una cristalización y reordenamiento de la estructura de amilasa y amilopectina que ocasiona cambios estructurales como es el endurecimiento, situación ésta que se reflejó en el aumento del esfuerzo de falla (Figura 3).

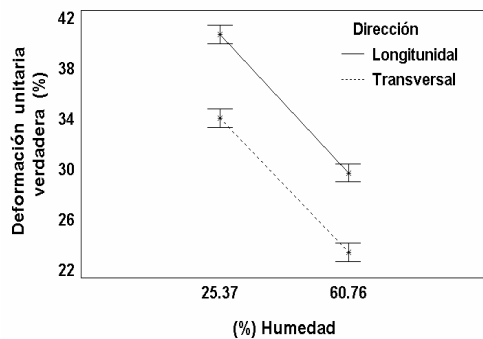
**Deformación unitaria real a la falla.** La Tabla 2 indica que la dirección de aplicación del esfuerzo y el contenido de humedad son factores que afectan la deformación del material ( $P < 0,05$ ) pero no su interacción ( $P > 0,05$ ).

**Tabla 2.** Análisis de varianza deformación unitaria verdadera

**Table 2.** ANOVA of the true strain to failure point.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medios	Valor F	PR > F
Humedad	1	820,311	820,311	472,86	< 0,0001
Dirección de fuerza	1	292,872	292,872	168,82	< 0,0001
Humedad*Dirección	1	0,229995	0,229995	0,13	0,7190
Error	24	41,6348	1,73478		
Total	27	1155,05			

En la Figura 4 se muestra los intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) para un análisis de varianza con un nivel de significancia del 5%, en el cual se observa que para una dirección de carga dada el producto alcanza a deformarse en mayor proporción a medida que se disminuye el contenido de agua del producto, situación ésta que puede ser explicada por el proceso de retrogradación de los almidones presente en el tubérculo de Yuca.



**Figura 4.** Deformación unitaria verdadera al punto de falla.

**Figure 4.** True strain of the cassava to failure point.

Para un contenido de humedad fijo el producto alcanza deformaciones más altas en sentido longitudinal que transversal, lo cual puede ser originado por la anisotropía presente en material y posiblemente a una disminución de la rigidez (mayor elasticidad) del material representado por el módulo de deformabilidad en la dirección de carga dada.

**Tenacidad.** La Tabla 3 muestra el análisis de varianza indicando que los factores porcentaje de humedad y la dirección de carga (longitudinal y transversal) son efectos significativos ( $P < 0,05$ ), pero su interacción no es significativa ( $P > 0,05$ ). El modelo de análisis de varianza mostró un coeficiente de determinación de  $R^2$  (0,6986) y para la prueba de Durbin Watson un valor de 2,02424.

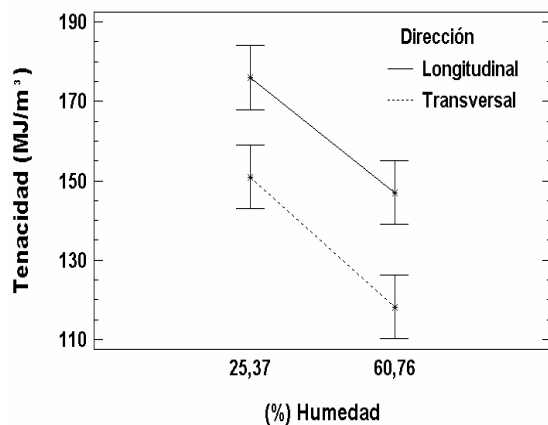
La Figura 5 se muestra los intervalos de mínimas diferencias significativas (LSD) para un análisis de varianza con un nivel de significancia del 5%. Los valores indican que la energía para romper

el material o densidad de energía es superior en dirección longitudinal que transversal independiente del contenido de agua del producto. Este comportamiento es consecuencia por el hecho de que si el esfuerzo a la falla y la

deformación a la cual se logra la falla son más altos en dirección longitudinal (Figuras 3 y 4) el área bajo la curva al punto de falla es mayor.

**Tabla 3.** Análisis de varianza para la tenacidad.  
**Table 3.** ANOVA to the toughness.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	PR > F
Humedad	1	6663,69	6663,69	31,59	< 0,0001
Dirección de fuerza	1	5050,24	5050,24	23,94	<0,0001
Humedad*Dirección	1	23,5174	23,5174	0,11	0,7413
Error	24	5062,06	210,919		
Total	27	16799,5			



**Figura 5.** Tenacidad promedio de la yuca  
**Figure 5.** Mean values of the toughness to the cassava root.

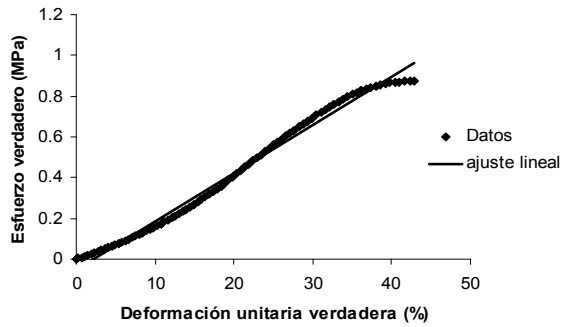
**Módulo de deformabilidad.** La Tabla 4 muestra el análisis de varianza el cual indica que la dirección de carga (longitudinal y transversal), el contenido de humedad del material y su

iteración es significativa al 5% ( $P < 0,05$ ). El coeficiente de determinación para el modelo del ANOVA fue de  $R^2$  (0,9509) y el valor de la prueba de Durbin Watson es 2,59953.

Un análisis de las diferentes curvas de flujo del material mostraron que hasta el punto donde se obtiene la falla, la relación entre el esfuerzo versus deformación en criterios verdaderos puede aproximarse como un modelo de regresión lineal de la forma  $\sigma_v = m \epsilon_v$ , donde  $m$  representaría el módulo de deformabilidad del material. Los modelos estadísticos indicaron que el modelo propuesto es altamente significativo a un nivel del 5% y coeficientes de determinación de ajuste ( $R^2$ ) superiores al 0,95. En la Figura 6 muestra una curva típica de ajuste.

**Tabla 4.** Análisis de varianza módulo de deformabilidad  
**Table 4.** ANOVA to the module of deformability

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	PR > F
Humedad	1	6,14766	6,14766	233,08	< 0,0001
Dirección de fuerza	1	4,75613	4,75613	180,32	<0,0001
Humedad*Dirección	1	1,37286	1,37286	52,05	<0,0001
Error	24	0,633029	0,0263762		
Total	27	12,9097			

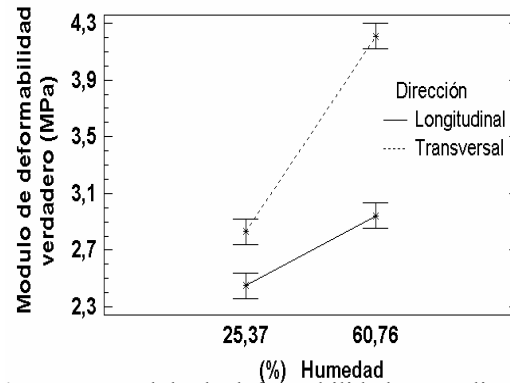


**Figura 6.** Curva típica de ajuste lineal para el módulo de deformabilidad.

**Figure 6.** Fitted lineal model to the deformability module

De acuerdo a lo anterior todas las curvas de flujo obtenidas en forma experimental fueron ajustadas mediante un modelo Hookeano, cuyo análisis estadísticos en función de la dirección de carga y contenido humedad se muestra en la Figura 7. Un análisis de la Figura 7, indican que el módulo de deformabilidad que es un indicativo de la rigidez del producto para una dirección de carga fija es mayor a medida que se incrementa la humedad del producto y que para contenido de humedad fijo la rigidez del producto es mas alta en dirección longitudinal que transversal.

Además un análisis de la Figura 7 y 4 muestran que a medida que la rigidez del material disminuye su capacidad para deformarse aumenta y en forma viceversa, lo cual concuerda con White (1999).



**Figura 7.** Módulo de deformabilidad promedio de la yuca.

**Figure 7.** Deformability module of the cassava root.

Con el fin de visualizar el efecto que toma el cambio de la sección transversal en el comportamiento reológico del producto durante el proceso de compresión, la Tabla 5 muestra una prueba Duncan a un nivel de significancia del 5% teniendo como efectos fijos la dirección de carga y el contenido de humedad del producto.

Un análisis estadístico mostró que los esfuerzos reales o verdaderos ( $\sigma_v$ ) de falla son estadísticamente inferiores respecto a los esfuerzos de falla calculados de forma ingeniería ( $\sigma_{ing}$ ) y para la variable de respuesta deformación unitaria a la falla, la deformación real o verdadera ( $\varepsilon_v$ ) es estadísticamente superior con respecto a la de ingeniería ( $\varepsilon_{ing}$ ).

**Tabla 5.** Prueba Duncan para la caracterización reológica.

**Table 5.** Duncan test to the rheological characterization

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DIRECCIÓN DE CARGA											
	LONGITUDINAL						TRANSVERSAL					
	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_{ing}$ (MPa)	$\varepsilon_v$ (%)	$\varepsilon_{ing}$ (%)	$U_v$ (MJ/m <sup>3</sup> )	$U_{ing}$ (MJ/m <sup>3</sup> )	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_{ing}$ (MPa)	$\varepsilon_v$ (%)	$\varepsilon_{ing}$ (%)	$U_v$ (MJ/m <sup>3</sup> )	$U_{ing}$ (MJ/m <sup>3</sup> )
60,76	0,80 <sup>A</sup>	1,09 <sup>B</sup>	29,71 <sup>C</sup>	27,08 <sup>D</sup>	146,94 <sup>E</sup>	162,21 <sup>E</sup>	0,73 <sup>F</sup>	0,93 <sup>G</sup>	23,42 <sup>H</sup>	22,08 <sup>I</sup>	118,25 <sup>J</sup>	126,91 <sup>J</sup>
25,37	0,86 <sup>K</sup>	1,32 <sup>L</sup>	40,72 <sup>M</sup>	34,55 <sup>N</sup>	175,96 <sup>P</sup>	198,14 <sup>P</sup>	0,83 <sup>Q</sup>	1,17 <sup>R</sup>	34,07 <sup>U</sup>	29,40 <sup>T</sup>	150,93 <sup>Z</sup>	157,17 <sup>Z</sup>

\*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ ).  $\sigma$ =Esfuerzo,  $\varepsilon$ =deformación unitaria,  $U$ = Tenacidad,  $v$ = evaluada bajo condiciones reales,  $ing$  = evaluada bajo condiciones de ingeniería.

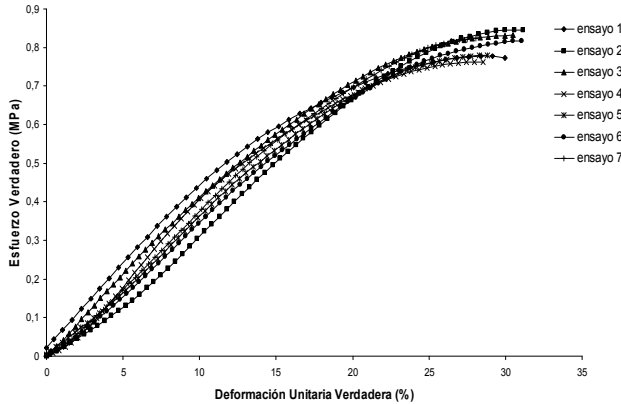
Esto es debido al aumento del área transversal y a la disminución de la longitud de la probeta en el proceso de compresión. Estas diferencias en la cuantificación del

esfuerzo y deformación unitaria tienen un impacto significativo en la construcción de las curvas de flujo del material y han sido reportadas por Gere (2001), para la prueba



de compresión y en forma inversa para la prueba de tensión. Para la variable la tenacidad el efecto del cambio de área

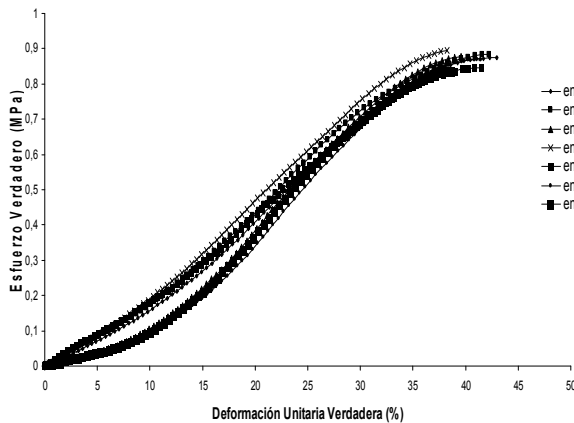
**Ajuste sigmoïdal.** La Figura 8 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de compresión en dirección longitudinal a las fibras con 60,79% de humedad. La carga máxima soportada en promedio fue de 0,80MPa.



**Figura 8.** Curva de flujo en sentido longitudinal (contenido de humedad: 60,76% b.h)

**Figure 8.** Flow curve to longitudinal loading sense (moisture content: 60,76 % w.b)

La Figura 9 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de compresión en dirección longitudinal a las fibras con 25,37% de humedad. La carga máxima soportada en promedio fue de 0,86MPa.

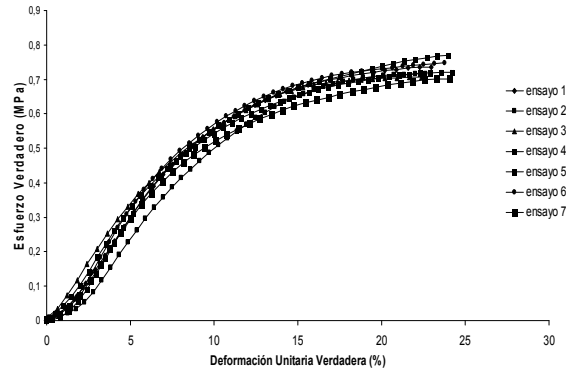


**Figura 9.** Curva de flujo en sentido longitudinal (contenido de humedad: 25,37% b.h)

**Figure 9.** Flow curve to longitudinal loading sense (moisture content: 25,37% w.b)

transversal no resultó estadísticamente significativo.

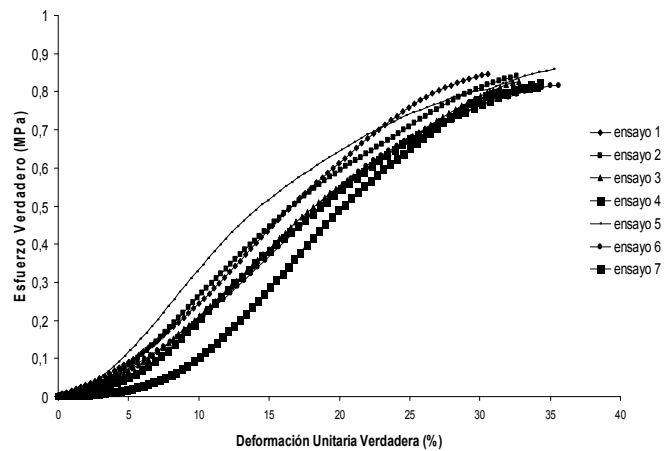
La Figura 10 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de compresión en dirección transversal a las fibras con 60,76% de humedad. La carga máxima soportada en promedio fue de 0,73MPa.



**Figura 10.** Curva de flujo en sentido transversal (contenido de humedad: 60,76% b.h)

**Figure 10.** Flow curve to transversal loading sense (moisture content: 60,76 % w.b)

La Figura 11 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de compresión en dirección transversal a las fibras con 25,37% de humedad. La carga máxima soportada en promedio fue de 0,83MPa.



**Figura 11.** Curva de flujo en sentido transversal (contenido de humedad: 25,37% b.h)

**Figure 11.** Flow curve to transversal loading sense (moisture content: 25,37% w.b)

Las Figuras 8, 9, 10 y 11 se pueden ajustar a una curva sigmoide de la forma:

$$\sigma_V = \frac{A * (\varepsilon_V)^n}{1 + (EXP(B - C * \varepsilon_V))} \quad [8]$$

Donde:

$\sigma_V$  = Esfuerzo real o verdadero (MPa)

$\varepsilon_V$  = Deformación real unitaria (%).

EXP = Base de los logaritmos naturales.

A = Asíntota superior.

B = Constante de integración que define la posición de la curva con relación a su origen.

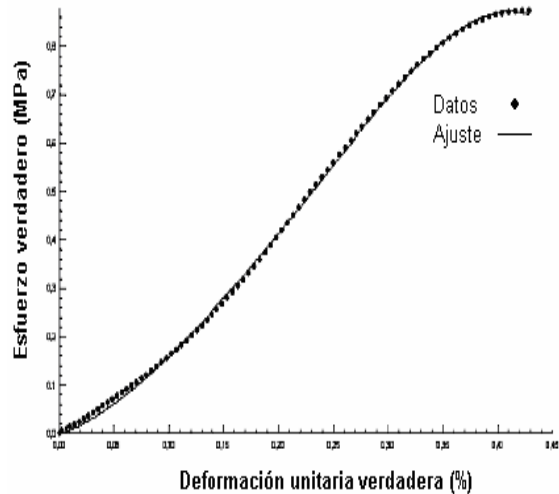
C = Índice de crecimiento.

En la Tabla 6, mediante una regresión no lineal realizada en el software del programa estadístico DataFit versión 8.1, se obtuvieron los parámetros de ajuste de la expresión [8].

En la Figura 12, se muestra la forma típica de representar una curva sigmoide, después de hacer el respectivo ajuste estadístico.

Un análisis de las diferentes curvas de flujo determinadas en condiciones reales muestra una concavidad, lo cual es típico para los materiales

de naturaleza biológica. Esta concavidad es el resultado de la expansión de la sección transversal de la muestra durante el proceso de compresión y a la no linealidad de la deformación, ésta última originada posiblemente por las altas deformaciones obtenidas para las condiciones dadas. Similar comportamiento ha sido reportado por Calzada y Peleg (1978).



**Figura 12.** Curva sigmoide ajustada para prueba de compresión unidireccional en yuca

**Figure 12.** Fitted model to sigmoid curve in the compression test of samples of cassava root.

**Tabla 6.** Parámetros de ajuste de la curva sigmoide  
**Table 6.** Parameters to the fitted model using the sigmoid curve.

Humedad	Dirección	n	A	B	C	PR > F
60,76	Longitudinal	1,260	32,17864	0,86288	-3,80829	<0,0001
25,37	Longitudinal	1,395	3,95790	-6,96517	-14,11953	<0,0001
60,76	Transversal	0,291	1,12243	1,77242	49,84951	<0,0001
25,37	Transversal	0,696	1,82847	1,95242	22,11681	<0,0001

#### 4. CONCLUSIONES

Los tubérculos de Yuca son materiales significativamente anisotrópicos por lo cual sus propiedades reológicas evaluadas bajo compresión unidireccional dependen significativamente de la dirección sobre la cual se impone la deformación o esfuerzo.

Debido a la anisotropía presente en el material (tubérculo de Yuca), el esfuerzo y la deformación unitaria en criterio de falla, la

tenacidad o densidad de energía y el módulo de deformabilidad no son constantes en el material presentando además una alta dependencia con el contenido de agua (humedad del producto).

Las curvas de flujo del material en compresión unidireccional determinadas en condiciones reales o naturales (modelo de Hencky) difieren de las curvas de flujo nominales, por lo tanto las propiedades reológicas determinadas de dichas curvas pueden ser afectadas por la geometría del

producto y la velocidad de deformación impuesta.

## 5. RECOMENDACIONES

Realizar estudios a nivel microestructural del tubérculo de Yuca, con el fin de determinar su relación con el comportamiento reológico a nivel macroestructural.

Realizar un estudio de termodependencia del producto con el objetivo de visualizar el efecto de gelatinización y retrogradación en la respuesta reológica del material.

Desarrollar nuevos ensayos en el que se considere la forma de manipulación y procesamiento industrial y manejo a nivel de poscosecha del producto.

Realizar ensayos a compresión unidireccional a diferentes velocidades de deformación y relaciones geométricas (diámetro-altura).

Dado que esta investigación es básica, se recomienda que este trabajo sea la base para futuros trabajos de investigación dirigidos a complementar el comportamiento reológico de éste tubérculo.

## REFERENCIAS

[1] AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE), Standards, engineering practice and data (37<sup>th</sup> edition). Michigan, U.S.A. 1990.

[2] BAUDI, D. S., Química de los alimentos, Longman Editores S.A, México, 1999.

[3] CALZADA, J.F. y PELEG, M., Mechanical interpretation of compressive stress-strain relationships of solid foods, Journal of food science, 1087-1092, 1978.

[4] CEBALLOS, H. y DE LA CRUZ, G. A., La yuca en el tercer milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. Centro

Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali-Colombia, 2002.

[5] CHÁVEZ, S. y FRANCO, H., Propiedades biomecánicas de los frutos, caso zarzamora. En: Memoria IX Curso de Actualización, Frutales con Futuro en el Comercio Internacional. Fundación Salvador Sánchez Colin, CICTAMEX, S.C. México, 1996.

[6] COCK, J. H., La Yuca, nuevo potencial para un cultivo tradicional, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali-Colombia, 1989.

[7] DANIEL, R. James y WHISTLER, Roy L., Principal changes in starches during food processing, En: Chemical changes in food processing, AVI, Published by Van Nostrand Reinhold Company, New York, 305-323, 1985.

[8] DOBRASZCZYK, B.J. y MORGENSTERN, M.P., Rheology and the breadmaking process, Journal of Cereal Science 38, 229-245, 2003.

[9] DOMINGUEZ, C. E; CEBALLOS, L. F y FUENTES, C., Morfología de la planta de Yuca: Investigación, producción y utilización. Programa de Yuca, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali-Colombia, 1983.

[10] GERE, James M., Mechanics of materials (Fifth edition), Brooks/Cole, New York, 2001.

[11] MOHSENIN, N, Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics and mechanical properties, Gordon and Breach Science Publisher, New York, 1986.

[12] STROSHINE, Richard, Physical properties of agricultural materials and food products. West Lafayette: Department of Agricultural and Biological Engineering, 1999.

[13] TAUB, Irwin A y SINGH R. Paul, Food Storage Stability, CRS Press, Estados Unidos, 1997.

[14] TABILO MUNIZAGA, Gipsy y BARBOSA CANOVAS, Gustavo V., Rheology for food industry, *Journal of Food Engineering*, 67, 147–156, 2005

[15] WHEATLEY, C., Calidad de las raíces de yuca y factores que intervienen en ella. En: Hershey CH (ed.). *Mejoramiento genético de la yuca en América Latina*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1991, p. 267-291.

[16] WHITE, M. A., *Properties of Materiales*, Oxford University Press, New York, 1999.

[17] XIE, F; DOWELL, F. E y XIUZHI S. S., Using Visible and Near-Infrared reflectance Spectroscopy and Differential Scanning Calorimetry to Study Starch, Protein and temperature Effects on Bread Staling, *Cereal Chemistry*, 81(2), 149-154, 2004.