

ESTUDIO PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO REOLOGICO BAJO COMPRESIÓN UNIDIRECCIONAL DE LA PULPA DE PLÁTANO (*Musa AAB Simmonds*)

BASIC STUDY OF THE RHEOLOGICAL RESPONSE UNDER UNIDIRECTIONAL COMPRESSION OF PLANTAIN PULP (*Musa AAB Simmonds*)

HÉCTOR JOSÉ CIRO VELÁSQUEZ

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

FABIAN ARMANDO MONROY LAITON

Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

ELKIN ALONSO CORTÉS MARÍN

Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

Recibido para revisar junio 06 de 2007 aceptado Octubre 07 de 2007, versión final Noviembre 13 de 2007

RESUMEN: Pulpa de plátano Dominico-Hartón fue sometida a ensayos de compresión unidireccional usando un analizador de textura TA-XT2i. Las curvas de flujo y las propiedades reológicas del producto a condición de falla como esfuerzo, deformación y tenacidad fueron determinadas. La pulpa fue sometida a dos direcciones de carga (longitudinal y transversal) en tres posiciones a lo largo del eje longitudinal del producto: inicial, medio y final. Los análisis estadísticos mostraron que el material es altamente anisotrópico, donde la dirección de carga y la posición dentro de la material son efectos significativos en la respuesta reológica del producto.

PALABRAS CLAVE: plátano, reología, propiedades mecánicas.

ABSTRACT: Samples of plantain pulp (*Musa AAB Simmonds*) were subjected to tests of unidirectional compression using an analyzer of texture TA-XT2i. The true flow curves (stress-strain) and rheological properties such as stress, strain and toughness to failure point were evaluated. The material was subjected under two loading direction (longitudinal and transversal) and three positions throughout the longitudinal axis of the product: initial, middle and final. The statistical analyses showed that the product is highly anisotropic, where the direction of load and the position within the material are significant effects in the rheological response of the material.

KEY-WORDS: Plantain, rheology, mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el plátano es un cultivo de gran importancia estratégica dentro del sector rural, además ocupa un lugar destacado en el suministro urbano de alimentos. Así mismo, es un cultivo de gran importancia, ya que participa con el 6,8% del total de la producción agrícola, ocupando el quinto lugar después

del café, caña de azúcar, banano y flores. El plátano es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, después del arroz, el trigo y maíz y es uno de los principales productos de la canasta familiar, el cual es ampliamente utilizado en la agroindustria para la producción de harina y de alimentos concentrados para alimentación animal, así como para la producción de alimentos procesados (Espinel *et al.*, 2006).

El cultivo de plátano ha sido un sector tradicional de economía campesina, de subsistencia para pequeños productores, de alta dispersión geográfica y de gran importancia socioeconómica desde el punto de vista de seguridad alimentaria y de generación de empleo. Actualmente cerca de un 4% de la producción nacional de plátano se destina al mercado de exportación, el restante se destina para el consumo interno en fresco y una muy pequeña proporción, menos del 1%, se destina como materia prima para la agroindustria nacional (Espinel *et al.*, 2006).

La calidad de este producto es muy variable debido a la diversidad de tecnologías y sistemas de producción aplicados. Los procesos de cosecha y poscosecha son definitivos en la calidad final del producto para el consumidor. Se estima que en el país hay pérdidas de entre 10% y 12% por comercialización y transporte. Las actividades identificadas que causan más pérdidas en la producción son: manejo indebido en el corte, acopio incorrecto en finca, transporte inadecuado a los centros de distribución e inexistencia de tecnologías de manejo y conservación.

La reología de alimentos se define como el estudio de la deformación de la materia prima, los productos intermedios, y productos finales de la industria alimentos (Boume, 2002; Rao y Steffe, 1992; Rosenthal, 1999). Así, la reología intenta definir la relación entre el esfuerzo aplicado sobre un material y la deformación o flujo resultante que toma lugar (Tabilo y Barbosa, 2005).

En la mayoría de los alimentos sólidos la distribución de la fuerza no es uniforme y los enlaces se distorsionan produciéndose una deformación progresiva y no totalmente recuperable. La incidencia del comportamiento viscoso en su comportamiento mecánico no es despreciable, y debe tenerse en cuenta al caracterizarlos reológicamente, lo que implica la necesidad de aplicar la teoría de la visco elasticidad (Rao, 1999; Ferguson y Kembrowski, 1991; Peleg and Bagley, 1983).

Las propiedades mecánicas de los alimentos y de los productos agrícolas han recibido una considerable atención debido a su importancia y necesidad para los procesos de simulación a grande escala, control de calidad, desarrollo y optimización. Las pruebas de compresión uniaxial es el medio más popular para definir algunas propiedades reológicas de estos tipos de

materiales (Charalambides *et al.*, 2005; Costell *et al.*, 2002; Scalon y Long, 1995).

Varias propiedades reológicas, sus métodos de determinación y los parámetros que las afectan han sido reportadas por Canet *et al.*, (2007), Ciro^{ab} *et al.*, (2007), Ciro^{cd} *et al.*, 2005, Ciro^e *et al.*, 2003, Mohsenin (1986), Peleg (1987), Pollak y Peleg (1980), Steffe (1996), Strohine (1999) y Zúñiga *et al.*, (2007).

A pesar de que existen un amplio número de investigaciones a nivel mundial en diversos productos agrícolas, en Colombia es escasa la información de las características viscoelásticas y las propiedades reológicas de esta clase de materiales.

Este trabajo evaluó experimentalmente bajo compresión unidireccional en diferentes condiciones de carga (longitudinal y transversal), algunas propiedades reológicas y las curvas de flujo de la pulpa de plátano. Los ensayos fueron realizados a velocidad de deformación, temperatura y humedad relativa constante.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

el trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Ingeniería de Procesos Agrícolas de la Universidad de Colombia-Sede Medellín a una temperatura y humedad relativa de 22°C e 66%, respectivamente.

Materiales

- Analizador de textura TA-XT2i.
- Software Texture Expert Exceed, version 2.64 (Stable Micro Systems, London, U.K.).
- Plátano variedad Dominico-Hartón en estado verde.
- Sacabocados cilíndricos: altura (29,6 mm) y diámetro (21,2 mm).

Los plátanos para los respectivos ensayos fueron adquiridos de un proveedor exclusivo de la variedad Dominico-Hartón procedente del departamento del Quindío. El producto fue mantenido en refrigeración controlada a 12°C.

Se tomaron 96 muestras en total: 48 en posición longitudinal y 48 en posición transversal. Además, se consideró la posición de muestreo, según la secuencia indicada en la Figura 1.

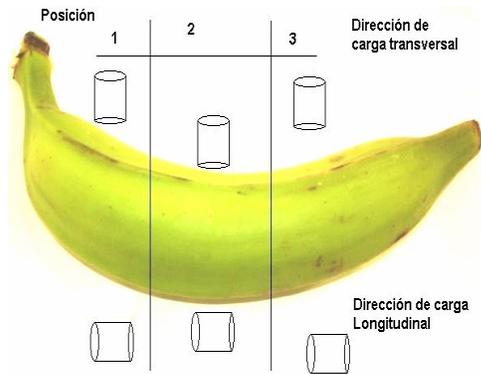


Figura 1. Material de ensayo
Figure 1. Sampling material

Las muestras de pulpa fueron sometidas a compresión unidireccional utilizando un analizador de textura TA-XT2i. Fue usado el software Texture Expert Exceed®, versión 2.64 para adquisición de datos. Los siguientes parámetros de operación fueron establecidos como constantes en todos los ensayos: velocidad de carga de 1 mm/s, área transversal y altura muestra de 298,6 mm² y 18 mm, respectivamente.

Las curvas de flujo esfuerzo-deformación unitaria en condición “real” se determinaron con las siguientes relaciones dadas por Gere (2001) y Popov (1999):

Para el esfuerzo:

$$\sigma_v = \frac{F}{A(t)} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

Para la deformación unitaria:

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)$$

En estas expresiones:

σ_v = esfuerzo real o verdadero (Pa)

σ = esfuerzo de ingeniería (Pa)

F = fuerza aplicada (N)

$A(t)$ = área instantánea (m²).

ε_v = deformación unitaria real o verdadera (m/m).

ε = deformación unitaria de ingeniería (m/m)

El esfuerzo a compresión de ingeniería (σ) fue determinado por el Software Texture Expert Exceed, version 2.64 (Stable Micro Systems, London, U.K.):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

De la misma manera, la deformación unitaria ε nominal o de ingeniería fue determinada como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

Siendo:

H_0 = altura inicial (m).

ΔH = cambio en la altura (m).

A_0 = Área transversal de la muestra cilíndrica (m²)

La tenacidad que define la capacidad de un material para absorber energía antes de la ruptura (Popov, 1999), se determinó midiendo el área bajo la curva de flujo esfuerzo *versus* deformación unitaria hasta el punto de falla del material. Este parámetro reológico, además del esfuerzo y la deformación al punto de falla fueron determinados según la metodología dada por Ciro^a *et al.*, (2007).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esfuerzo real de falla: el efecto de las direcciones de carga (transversal, longitudinal) y la posición sobre la variable esfuerzo de falla fue estadísticamente significativa ($P < 0,05$), como lo muestra el análisis de varianza dado en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de varianza para el esfuerzo real de falla
Table 1. ANOVA to the failure true stress

Fuente de Variación	Valor de P
Posición	0,0009
Dirección de carga	0,0011
Posición x Dirección de carga	0,0263

De la Figura 2, se puede observar que en la dirección longitudinal el esfuerzo de falla es independiente de la posición de donde se tome la muestra. Para la posición transversal la resistencia a la compresión varía según la posición de muestreo: (1) y (2) presentan la mayor y menor condición de resistencia del producto, respectivamente. Comparando el efecto del sentido de carga, la pulpa de plátano muestra mayor resistencia a la compresión en sentido longitudinal que transversal para las posiciones de muestreo evaluadas excepto para la posición (1). El punto central del producto puede considerarse una posible condición crítica.

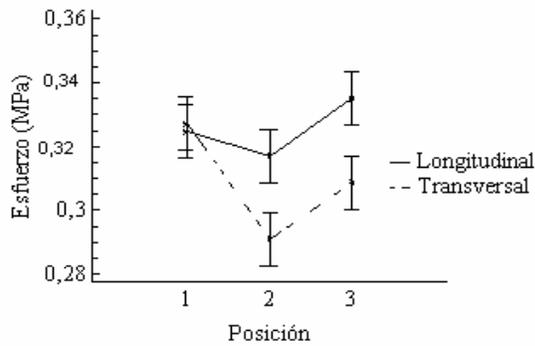


Figura 2. Esfuerzos de falla del material según la posición de muestreo

Figure 2. True failure stress according to sampling place

Deformación unitaria real al punto de falla: en la Tabla 2 se muestra el análisis de varianza ($P=0,05$) de los efectos de la dirección de carga (transversal, longitudinal) y de la posición (1,2 y 3) sobre la variable deformación real unitaria al punto de falla. Los análisis indicaron que la dirección de carga tiene un efecto significativo ($P<0,05$) pero no la posición o lugar de muestreo ($P>0,05$).

Tabla 2. Análisis de varianza para la deformación unitaria real a la falla

Table 2. ANOVA to true strain in the failure point

Efecto estadístico	Valor de P
Dirección de carga	0,00000
Posición	0,464
Posición x Dirección de carga	0,8490

La Tabla 3 muestra la prueba de diferenciación significativa mínima de Duncan ($P=0,05$) para el efecto de la dirección de carga. Los resultados muestran que la pulpa de plátano alcanza deformaciones reales al punto de falla más altas, en posición transversal que longitudinal siendo estadísticamente diferentes.

Tabla 3. Prueba Duncan para la deformación real unitaria

Table 3. Duncan's Test to true strain in the failure point

Dirección de carga	Media* (m/m)	Límite inferior (m/m)	Límite superior (m/m)
Longitudinal	0,30 ^A	0,29	0,31
Transversal	0,36 ^B	0,34	0,38

* Promedios con letra diferente son estadísticamente diferentes a un nivel del 5%.

Tenacidad del material: el efecto del sentido de carga (transversal y longitudinal) sobre la variable tenacidad fue estadísticamente significativa, pero no la posición (1, 2 y 3) como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de varianza para la tenacidad

Table 4. ANOVA to the toughness

Efecto significativo	Valor de P
Dirección de carga	0,0005
Posición	0,1528
Posición x Dirección de carga	0,10005

En la Tabla 5 se muestra la prueba de diferenciación de medias de Duncan a un nivel $P=0,05$. Los resultados indican que en dirección transversal el producto absorbe mayor energía con respecto a la dirección de carga longitudinal. Esta condición puede ser originada al mayor grado de deformación obtenido para la carga transversal (Tabla 3).

Tabla 5. Prueba Duncan para la tenacidad

Table 5. Duncan's Test to toughness

Dirección de carga	Media* (MJ/m ³)	Límite inferior (MJ/m ³)	Límite superior (MJ/m ³)
Longitudinal	0,064 ^A	0,062	0,066
Transversal	0,071 ^B	0,069	0,073

* Promedios con letra diferente son estadísticamente diferentes a un nivel del 5%.

Análisis de curvas características de flujo

Las Figuras 3, 4 y 5 representan las curvas de flujo en términos reales esfuerzo-deformación más representativas de los ensayos. Al observar la forma de la curva y compararla con lo encontrado en la literatura (Salisbury y Ross, 1991; www.ceyce.org.ar:2200/agroneg.html; www.mag.go.cr/congreso_agronómico_XI/a50-6907-II_349.pdf), su forma es característica de una curva sigmoide de crecimiento, en la cual se identifican tres fases: una fase logarítmica, una fase lineal y una fase de senescencia. Al hacer una interpretación mecánica, la región logarítmica representaría la parte plástica del material, la fase lineal sería la parte elástica (en la cual se cumple la ley de Hook) (Gere, 2001) y la parte senescencia sería de nuevo la parte plástica; las anteriores analogías descritas serían comprobadas por el comportamiento plástico y elástico (extensibilidad) de la pared celular (Salisbury y Ross, 1991), donde se

comprueba que los materiales biológicos su comportamiento mecánico característico es de sólidos viscoelásticos (Ibarz y Barbosa, 2003; Costell *et al.*, 2002).

La alta anisotropía de la pulpa de plátano resulta demostrada por la alta variación de los esfuerzos y deformaciones de una posición a otra dentro de la pulpa (Figura 3 y 4). La disposición de los tejidos en la pulpa hace que las paredes celulares estén situadas de tal forma que hacen que la muestra sea más resistente en posición longitudinal que transversal (Figura 5). En investigaciones sobre la pared celular se le atribuyen características elásticas y plásticas que confirman los altos esfuerzos que soportan en sus procesos metabólicos y físicos (Salisbury y Ross, 1991).

Si se compara los tres lugares (1, 2 y 3) para las direcciones de carga transversal y longitudinal, la posición 2 posee menos resistencia a la compresión (Figuras 3, 4 y 5). Además, la posición 2 es más resistente a la compresión en dirección longitudinal que transversal (Figura 5), pero la capacidad que tiene de absorber energía en esta posición con carga longitudinal es menor (Tabla 3).

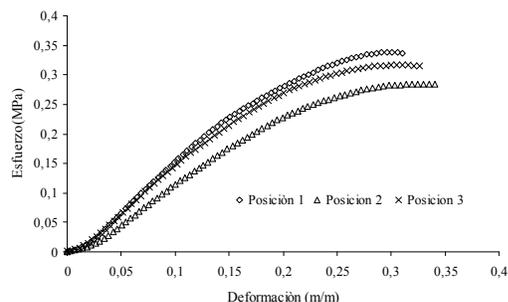


Figura 3. Curvas de flujo esfuerzo- deformación verdadera en carga transversal.

Figure 3. True stress-strain curves in transversal loading.

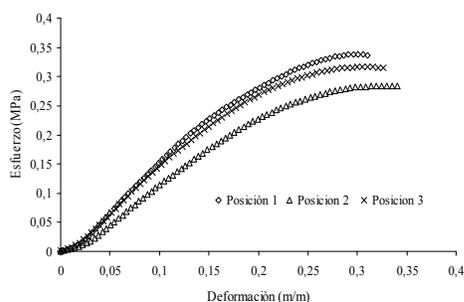


Figura 4. Curvas de flujo esfuerzo- deformación verdadera en carga Longitudinal.

Figure 4. True stress-strain curves in longitudinal loading.

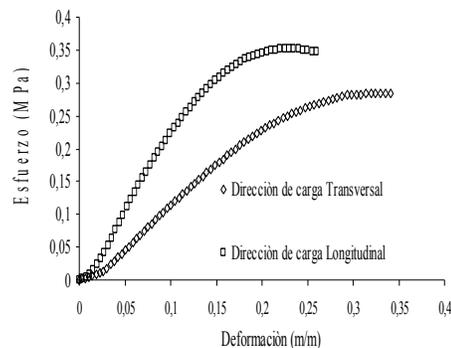


Figura 5. Curvas de flujo esfuerzo deformación para carga transversal y longitudinal en la posición 2.

Figure 5. True stress-strain curves in longitudinal loading to the position 2.

En cuanto a los módulos de elasticidad del material, la Figura 5 indica que su valor depende de la dirección de carga, lo cual es una característica básica de los materiales heterogéneos no elásticos. El módulo de elasticidad aparente es más alto en sentido longitudinal que transversal.

4. CONCLUSIONES

Según las curvas de flujo de la pulpa de plátano, el producto bajo cargas compresivas posee más resistencia a la falla en dirección longitudinal que transversal indicando una alta presencia anisotrópica. Además, el punto central del producto adquiere relevancia para efectos de transporte, empaque y manejo a nivel de poscosecha debido a su menor resistencia.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos bajo diferentes relaciones de esbeltez y velocidad de carga, con el fin de analizar sus efectos sobre las propiedades mecánicas del material.
- Iniciar estudios a nivel de microestructura del producto, con el objetivo de establecer y encontrar una relación con la respuesta a nivel macroestructural del producto.
- Ya que el producto es de naturaleza termo-higroscópica efectuar mediciones a diferentes niveles de contenido de humedad (contenido de agua), y condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa).

- Evaluar el efecto del tiempo de poscosecha en la respuesta reológica material.

REFERENCIAS

[1] BOURNE, MALCOLM. Food texture and viscosity (Second edition). New York: Academic Press, 2002.

[2] CIRO^A VELÁSQUEZ, HÉCTOR JOSÉ, LARGO AVAILA, STEBAN Y CASAFUS PIEDRAHITA, HAMED SANTIAGO. Caracterización reológica de la yuca (manihot esculenta crantz) parte I: respuesta a la compresión unidireccional, *Dyna*, 74 (151), 25-36, 2007.

[3] CIRO^B VELÁSQUEZ, HÉCTOR JOSÉ, BUITRAGO GIRALDO, OMAR HIDEKI, PÉREZ ARANGO, SEBASTIÁN ADOLFO. Estudio preliminar de la resistencia mecánica a la fractura y fuerza de firmeza para fruta de uchuva (physalis peruviana L), *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 60(1), 3785- 3796, 2007.

[4] CIRO^C VELÁSQUEZ, HÉCTOR JOSÉ, MONTOYA LOPEZ, MARY LUZ, MILLÁN CARDONA, LEÓNIDAS DE JESÚS. Caracterización de propiedades mecánicas del banano (Cavendish Valery), *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 58(2), 2975-2988, 2005.

[5] CIRO^D VELÁSQUEZ, HÉCTOR JOSÉ, OSORIO TOBÓN, JUAN FELIPE, MEJÍA RESTREPO, LUIS GUILLERMO Caracterización reológica y textural del queso Edam, *DYNA*, 72(143), 33- 45, 2005.

[6] CIRO^E VELÁSQUEZ, HÉCTOR JOSÉ, CORTÉS, ELKIN, VAHOS MONSALVE, DIEGO. Fuerza de fractura superficial en granadilla (*pasiflora ligularis juss*) y tomate de árbol (*Cyphomandra betacea sendt*): Estudio experimental, *Revista Nacional de Agronomía Medellín*, 56(2), 2045-2076, 2003.

[7] COSTELL, E., FISZMAN, S., DURAN, L. Propiedades Físicas I, *Reología de sólidos y Texturas*. 2002. p 215-260. En: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (cyted), Instituto Politécnico nacional. Temas en Tecnología de Alimentos V1. Alfa omega. México. DF.

[8] CANET, W., ALVAREZ, M.D. and GIL, M.J. The analysis of frictional, displacement rate and sample dimension effects on fracture parameters from uniaxial compression of potato. *Journal of Food Engineering*, 80, 342–352, 2007.

[9] CHARALAMBIDES, M. N., GOH, S. M., WANIGASOORIYA, L., WILLIAMS, J. G. and Xiao, W. Effect of friction on uniaxial compression of bread dough. *Journal of Materials Science*, 40, 3375–3381, 2005.

[10] ESPINEL, C., MARTINEZ, H., PEÑA, Y. La cadena del plátano en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Documento de trabajo N0. 12, 2006.

[11] FERGUSON, J and KEMBLOWSKI, Z. *Applied fluid rheology*. New York: Elsevier Science Publishing, 1991.

[12] GERE, JAMES M. *Mechanics of materials (Fifth edition)*. New York: Brooks/Cole, 2001.

[13] IBARZ, A. and BARBOSA, G. *Unit operations in food engineering*. Florida: CRC Press, 2003.

[14] MOHSENIN, N. *Physical properties of plant and animal materials: structure, physical, characteristics and mechanical properties*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

[15] PELEG, MICHAEL and BAGLEY, EDUARD B. *Physical properties of foods*. New York: AVI Publishing Company, 1983.

[16] PELEG, M. *The basics of solid foods rheology*. En: *Food Texture: Instrumental and sensory measurements*. Editor: Howard R. Moskowitz, New York: CRC Press, 1-33, 1987.

[17] POLLAK, N. and PELEG, M. Early indications of failure at large compressive deformations. *J. Food Sci.*, 45:825-830, 835 1980.

[18] POPOV, E. *Engineering mechanics of solids*. New York: Prentice Hall, 1999.

[19] RAO, M.A. and STEFFE, J.F. *Viscoelastic properties of foods*. New York: ELSEVIER, 1992.

- [20] RAO, M. ANANDHA. Rheology of fluids and semisolids foods: Principles and applications. New York: Aspen publishers, 1999.
- [21] ROSENTHAL, ANDREW J. Food Texture: Measurement and Perception. New York: Aspen Publishing, 1999.
- [22] SALISBURY, F and ROSS, C. Plant physiology. New York: Brooks/Cole, 1991.
- [23] SCANLON, MARTIN G AND LONG, ALISON E. Fracture strengths of potato tissue under compression and tension at two rates of loading, Food Research International, 28(4), 397-402, 1995.
- [24] STEFFE, J.F. Rheological Methods in Food Process Engineering (second edition). Michigan: Freeman Press, 1996.
- [25] TABILO-MUNIZAGA, GIPSY AND BARBOSA-CANOVAS, GUSTAVO V. Rheology for the food industry. Journal of Food Engineering, 67, 147–156, 2005.
- [26] ZÚÑIGA HERNÁNDEZ, LUIS ALFREDO, CIRO VELÁSQUEZ, HÉCTOR JOSÉ Y OSORIO SARAZ, JAIRO ALEXANDER. Estudio de la dureza del queso Edam por medio de análisis de perfil de textura y penetrometría por esfera. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín, 60 (1), 3797-3811, 2007.
- [27] www.mag.go.cr/congreso_agronómico_XI/a50-6907-II_349.pdf (Consultada Septiembre 18 de 2006).
- [28] www.ceyce.org.ar.2200/agroneg.html (Consultada Agosto 13 de 2006).