

PROPIEDADES AERODINÁMICAS DE LOS FRUTOS DE CAFÉ

Juan Rodrigo Sanz-Uribe*; Claudia Milena Trujillo-Guarnizo**,
Carlos Eugenio Oliveros-Tascón*

RESUMEN

SANZ U., J.R.; TRUJILLO G., C.M.; OLIVEROS T., C. E. Propiedades aerodinámicas de los frutos de café. Cenicafé 59(1):55-63.2008

Se determinaron las propiedades aerodinámicas: área proyectada, velocidad terminal y coeficiente de arrastre de frutos de café de la variedad Colombia de cerezas rojas y amarillas, en diferentes estados de maduración. Así mismo, se determinaron las propiedades físicas: masa específica de los frutos y masa¹, involucradas en el cálculo de la velocidad terminal. Los mayores valores de masa se obtuvieron con frutos maduros. La masa específica fue estadísticamente igual para los diferentes estados de maduración y para las dos variedades estudiadas. Se determinó que la velocidad terminal de los frutos maduros es un 17% mayor que la registrada en los inmaduros, lo cual puede ser aprovechado para separar estos últimos. Se encontró también que el área proyectada es mayor a medida que se tiene mayor desarrollo del fruto. En general, el coeficiente de arrastre de los frutos de café puede ser considerado relativamente bajo, y son más aerodinámicos los frutos maduros por tener una superficie menos rugosa.

Palabras clave: Área proyectada, velocidad terminal, coeficiente de arrastre, masa, masa específica.

ABSTRACT

Aerodynamic properties such as projected area, terminal velocity, and drag coefficient of coffee cherries of the Colombia variety with red and yellow cherries were determined in different maturity stages. Similarly, physical properties like specific mass of the cherries and mass involved in calculating terminal speed were also verified. The specific mass was statistically equal for the different maturation stages and for both studied varieties. It was concluded that the terminal speed of the ripe cherries is 17% higher than the one registered in unripe cherries, which can be advantageous to separate the latter. It was also found that the projected area is greater as the cherries grow. In general, the drag coefficient of coffee cherries is relatively low and the mature cherries are more aerodynamic thanks to their smoother surface.

Keywords: Projected area, terminal velocity, drag coefficient, mass, specific mass.

* Investigador Científico II e Investigador Principal, respectivamente. Ingeniería Agrícola, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Ingeniera Agrícola

¹ Las propiedades físicas masa y masa específica son consideradas propiedades aerodinámicas dentro de este artículo.

Las propiedades aerodinámicas de los granos hacen parte importante de la información necesaria para la correcta selección de equipos para el proceso o transporte neumático, o para el desarrollo de sistemas de clasificación neumáticos.

Cuando un objeto cae libremente en el aire o en cualquier fluido, se desplaza con mayor aceleración al inicio y después, de algún tiempo, alcanza una velocidad constante. Durante esa caída el objeto experimenta las fuerzas que se muestran en el diagrama de cuerpo libre (Figura 1), donde F_r es la fuerza de arrastre y mg corresponde al peso del elemento. La variable y expresa el movimiento relativo del objeto en el fluido, en forma de desplazamiento vertical.

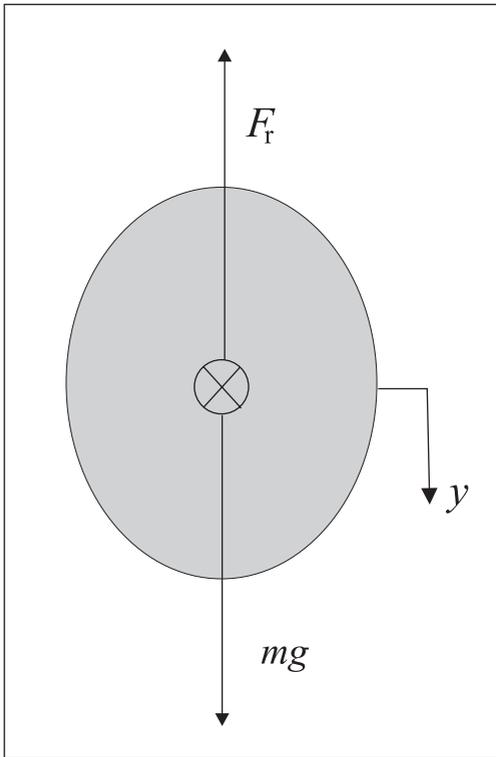


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de un objeto cayendo libremente en el aire.

La fuerza de arrastre puede ser obtenida de la componente cinética de la ecuación de Bernoulli (4), la cual, después de ser manipulada, se observa como se muestra en la Ecuación <<1>>,

$$F_r = \frac{c_d A_p \rho_f v^2}{2} \quad \langle\langle 1 \rangle\rangle$$

donde:

c_d es el coeficiente de arrastre del objeto en el fluido, el cual depende de la forma del objeto y del número de Reynolds, como se observa en la Figura 2 (6),

A_p es el área proyectada de manera perpendicular al movimiento,

ρ_f es la densidad del fluido, que en este caso es aire, y

v es la velocidad relativa entre el fluido y la partícula.

El número de Reynolds es un número adimensional que relaciona la velocidad con las propiedades del fluido que se usa y las propiedades geométricas del objeto en el fluido, el cual permite escalar hacia arriba o hacia abajo las variables involucradas. El número de Reynolds está dado por la Ecuación <<2>>

$$Re = \frac{v D \rho}{\mu} \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

donde:

v es la velocidad del fluido,

D el diámetro equivalente de la partícula,

ρ la densidad del fluido, y

μ la viscosidad cinemática del fluido.

La Figura 2 muestra que para las velocidades esperadas para el transporte y la clasificación neumática de frutos de café, el número de Reynolds está en el rango de trabajo mostrado. En este rango el coeficiente de arrastre

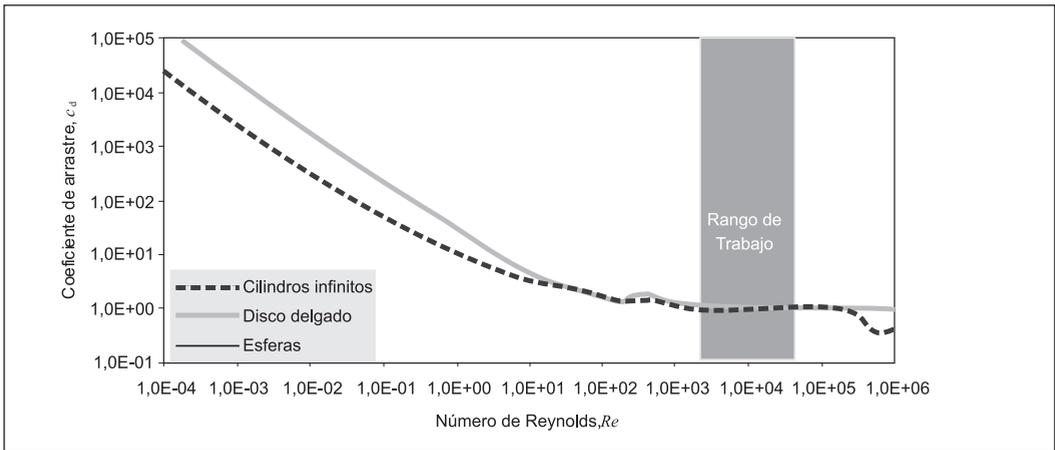


Figura 2. Coeficiente de arrastre para cuerpos de varias formas geométricas.

permanece aproximadamente constante, lo que indica independencia entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds en esta investigación. Para partículas esféricas el coeficiente de arrastre es aproximadamente 0,4, mientras que para partículas cilíndricas largas y discos delgados el coeficiente de arrastre es aproximadamente 1,0.

Si se aplica la segunda Ley de Newton al diagrama de cuerpo libre de la Figura 1, se obtiene la Ecuación <<3>>:

$$\frac{c_d A_p \rho_f v^2}{2} - m g = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad \langle\langle 3 \rangle\rangle$$

Al igualar a cero la Ecuación <<3>> se obtiene la velocidad terminal de un objeto, definida como la velocidad constante alcanzada por ese objeto en caída libre; ésta es función del coeficiente de arrastre (c_d), del área proyectada (A_p), de la masa (m), de la masa específica de la partícula (ρ_p) y de la densidad del fluido (ρ_f), como se aprecia en la Ecuación <<4>>.

$$v_T = \sqrt{\frac{2 m g}{c_d A_p \rho_f} \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p}} \quad \langle\langle 4 \rangle\rangle$$

La velocidad terminal de una partícula puede obtenerse a partir de la Ecuación <<4>>, si se somete a un flujo de aire ascendente capaz de suspenderla. La velocidad terminal es un dato necesario cuando se quieren seleccionar adecuadamente los componentes de un sistema de transporte neumático, debido a que teóricamente una partícula se movería dentro de un ducto vertical a una velocidad igual a la diferencia entre la velocidad del fluido y la velocidad terminal.

El coeficiente de arrastre es una propiedad aerodinámica que determina la facilidad con que se mueve un objeto en un fluido, que en las condiciones de velocidad depende principalmente de su geometría y rugosidad superficial. Entre más plana es la forma y mayor la rugosidad de la superficie, mayor será el coeficiente de arrastre. En la Figura 3 se muestra el efecto de la forma en el coeficiente de arrastre en partes metálicas bien acabadas superficialmente. Adicionalmente, en

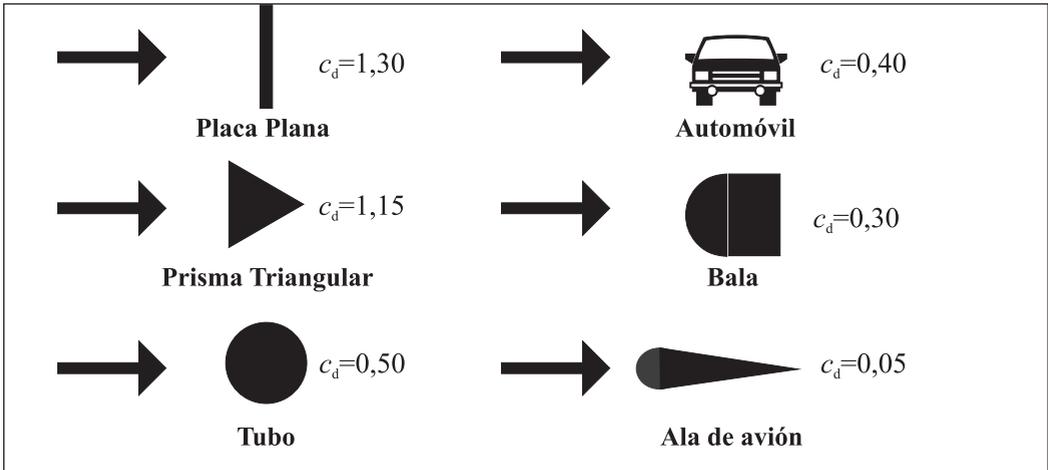


Figura 3. Coeficiente de arrastre de superficies metálicas con diferentes formas en aire (5).

las Tablas 1 y 2 se muestran algunos datos de masa, velocidad terminal y coeficiente de arrastre de diferentes granos, incluidos frutos de café.

$$c_d = \frac{2 m g (\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p v_T^2} \quad \langle\langle 5 \rangle\rangle$$

El coeficiente de arrastre se obtiene a partir de la velocidad terminal (v_T), la masa, la densidad y el área proyectada del objeto (Ecuación $\langle\langle 5 \rangle\rangle$):

El área proyectada es la superficie del cuerpo en un plano perpendicular a la dirección del movimiento relativo, entre el objeto y el fluido. Para granos y frutos

Tabla 1. Propiedades aerodinámicas de algunos granos (1).

Grano	Masa (g)	Velocidad terminal (m.s ⁻¹)	Coficiente de arrastre
Trigo	0,0454	9,0	0,50
Cebada	0,0331	7,0	0,50
Avena	Pequeña	5,9	0,47
	Grande	6,3	0,51
Millo	0,2994	10,6	0,56
Soya	0,2059	13,5	0,45
Esfera plástica	0,5262	16,7	0,43

como el del café, se puede aproximar al área cubierta por un diámetro de una esfera que contiene el mismo volumen del fruto. Así, la ecuación para calcular el área proyectada de esa manera es (Ecuación <<6>>)(2):

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left(\sqrt[3]{\frac{6 V_F}{\pi}} \right)^2 \quad \ll 6 \gg$$

donde:

V_F es el volumen del fruto.

Tabla 2. Propiedades aerodinámicas de frutos de café maduros e inmaduros (3).

Estado de maduración del café	Masa (g)	Velocidad terminal (m.s ⁻¹)	Coefficiente de arrastre
Fruto maduro	1,51	15,7	0,75
Fruto inmaduro	1,19	12,2	1,03

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con frutos de café en los estados inmaduro, pintón y maduro, de las variedades Colombia de cereza roja y amarilla, obtenidos de cafetos de segunda y tercera cosecha, sembrados en la Estación Central Naranjal, ubicada en el municipio de Chinchiná, a una altitud de 1.400 m, con un promedio de temperatura de 21,5°C, humedad relativa del 78% y precipitación anual de 2.711 mm.

Para la determinación de la masa se tomaron las masas de 60 frutos de cada uno de los estados de desarrollo mencionados, seleccionados al azar de la masa de café cosechado en la Estación Central, para lo cual se utilizó una balanza electrónica con sensibilidad de 0,001 g. Con los valores registrados se estimó el promedio para cada tipo de fruto y se determinaron los intervalos de confianza al 95%.

Para estimar la masa específica se utilizó el Principio de Arquímedes, con la ayuda de la misma balanza y de una estructura en alambre delgado y resistente, instalados de la forma como se ilustra en la Figura 4. De esa manera se obtuvo la fuerza de

empuje del agua sobre el fruto, que es igual al peso del volumen del líquido desalojado (Ecuación <<7>>):

$$F_E = \rho_a g V_F \quad \ll 7 \gg$$

donde:

F_E es la fuerza de empuje,
 ρ_a la densidad del agua, y
 V_F el volumen del fruto.

Con el valor experimental de F_E y el de ρ_a determinado por el método del picnómetro, se calculó el volumen de cada fruto, despejando V_F de la Ecuación <<7>>. La masa específica se determinó dividiendo la masa de cada fruto sobre su volumen V_F .

Para obtener el área proyectada se utilizó la Ecuación <<6>> y el volumen determinado con la Ecuación <<7>> y la metodología explicada anteriormente.

La velocidad terminal de cada fruto de café se obtuvo utilizando el arreglo experimental que se muestra en la Figura 5, el cual constaba de un ventilador centrífugo con caudal máximo de 22,0 m³.min⁻¹, movido por un motor trifásico de 1,5kW, para impulsar aire en un ducto de PVC de 82 mm de

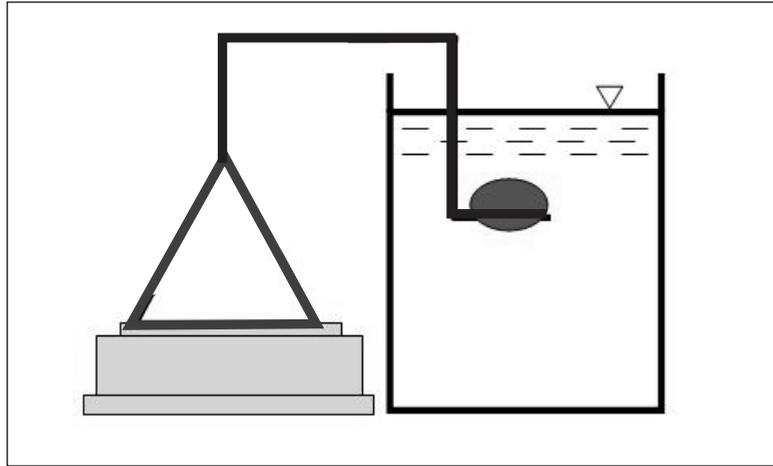


Figura 4.
Ilustración del mecanismo usado para determinar la fuerza de empuje del agua sobre frutos de café.



Figura 5. Arreglo experimental utilizado para determinar velocidad terminal de frutos de café.

diámetro nominal. Para obtener diferentes flujos de aire se construyó una válvula que permitió variar el área de succión del ventilador. Adicionalmente, se incluyó un laminador de flujo y se instaló interiormente una malla de alambre delgado sobre la cual se colocaron los frutos destinados para la determinación de esta propiedad. Al tubo

se le hicieron dos perforaciones de 12,7 mm de diámetro, para introducir un Tubo Prandtl y realizar las mediciones de presión de velocidad.

Cada fruto se colocó sobre la malla y se varió el flujo de aire hasta lograr que quedara suspendido; con el tubo de Prandtl se realizaron las mediciones de presión de velocidad. La velocidad se obtuvo utilizando la Ecuación <<8>> y considerando el tubo Prandtl acoplado a un manómetro en U con agua.

$$v = \sqrt{\frac{2 g \Delta h (\rho_m - \rho_f)}{\rho_f}} \quad \ll 8 \gg$$

donde:

Δh es la presión diferencial entre los dos terminales del tubo Prandtl expresado en metros de columna de agua,

ρ_m es la densidad del fluido en el manómetro en U, y

ρ_f es la densidad del fluido (en este caso aire).

Como la velocidad que se está midiendo corresponde a las condiciones de equilibrio

entre las fuerzas gravitacionales y las de arrastre, este valor corresponde a la velocidad terminal del fruto analizado.

El coeficiente de arrastre se determinó usando la Ecuación <<5>>, al reemplazar en ella la velocidad terminal, la masa específica, el área proyectada y la masa halladas anteriormente para cada fruto.

A los datos se les realizó un análisis estadístico descriptivo con una confiabilidad del 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran los valores medios y los coeficientes de variación (C.V.) de las propiedades aerodinámicas obtenidas para frutos de la variedad Colombia de cerezas amarilla y roja.

Se encontró que la masa de los frutos en los estados maduro y pintón es diferente para las dos variedades de café, pero no para el

estado inmaduro. Igualmente, se presentaron diferencias entre los tres estados de desarrollo del fruto para cada variedad evaluada, el valor más alto se registró para los frutos maduros de la variedad Colombia de cereza roja y los menores, en frutos inmaduros de variedad Colombia de cereza amarilla. En cuanto a la masa específica no se encontraron diferencias entre las dos variedades ni entre los estados de maduración considerados.

En cuanto al área proyectada se encontraron diferencias estadísticas entre las dos variedades para los estados maduro y pintón, mientras que los frutos inmaduros presentaron valores estadísticamente iguales. Todos los estados de desarrollo presentaron diferencias en esta variable. Los mayores valores se registraron en los frutos maduros y los menores en los frutos verdes.

En la variable velocidad terminal de los frutos de café se encontró diferencia en los estados maduro e inmaduro, el valor más alto se registró para el estado maduro. Las

Tabla 3. Propiedades aerodinámicas de los frutos de café*.

Descripción	Masa		Masa específica		Área proyectada		Velocidad terminal		Coeficiente de arrastre		
	\bar{X} (g)	C.V. (%)	\bar{X} (g.cm ⁻³)	C.V. (%)	\bar{X} (cm ²)	C.V. (%)	\bar{X} (m.s ⁻¹)	C.V. (%)	\bar{X} (dec)	C.V. (%)	
Amarillo	Maduro	1,72	14,7	1,07	2,5	2,41	15,2	19,33	4,0	0,29	8,1
	Pintón	1,44	18,8	1,05	4,6	2,07	19,8	18,26	4,4	0,32	9,5
	Inmaduro	1,19	20,1	1,07	12,1	1,67	15,8	16,49	5,0	0,40	16,1
Rojo	Maduro	2,05	13,9	1,06	1,7	2,89	13,8	18,68	4,4	0,31	8,7
	Pintón	1,69	14,7	1,06	1,9	2,39	14,6	18,25	3,0	0,32	6,2
	Inmaduro	1,29	14,4	1,06	4,6	1,82	13,3	17,53	4,8	0,35	9,3

*Análisis descriptivo con nivel de confiabilidad del 95%.

velocidades terminales fueron iguales en el estado pintón, para las dos variedades evaluadas. En cada variedad hubo diferencias entre los tres estados de desarrollo, con el mayor valor para los frutos maduros, por tener éstos mayores masas y área proyectada, seguidos de los frutos pintones e inmaduros.

La diferencia de velocidades terminales observadas entre frutos maduros e inmaduros puede utilizarse para el diseño de clasificadores neumáticos. La Figura 6 muestra una gráfica de frecuencias acumuladas para velocidades terminales de frutos de café con diferentes grados de desarrollo. De acuerdo con los resultados teóricos de la Figura 6, si se utilizara un promedio de velocidad de 17 m.s^{-1} en un ducto vertical (representada como un ejemplo en la Figura), se transportarían hacia arriba el 82,5% de los frutos inmaduros, el 10,1% de los frutos pintones y solamente el 0,3% de los frutos maduros. El 99,7% de los frutos maduros no serían arrastrados, al igual que el 79,9% de los frutos pintones y el 17,5% de los frutos inmaduros. Como el contenido de frutos inmaduros en la masa de café cosechada es minoría, se necesitaría un contenido original de más de 14% de frutos

inmaduros para que después de la clasificación neumática quede con un contenido mayor al aceptado (2,5%).

Para el transporte de frutos de café se debe usar una velocidad mayor a la obtenida para frutos maduros, para garantizar el transporte de frutos de café en todos los estados de maduración. Con una velocidad de más de 25 m.s^{-1} se puede garantizar el transporte confiable de frutos de café por ductos o tuberías.

En cuanto al coeficiente de arrastre se puede decir que, en general, los frutos de café son muy aerodinámicos. Al comparar los promedios de coeficiente de arrastre obtenidos para las variedades se observó que no existen diferencias significativas entre ellas para los estados maduro y pintón. Para el estado de fruto inmaduro se encontró diferencia entre las variedades. De la misma forma el coeficiente de arrastre del fruto inmaduro presentó diferencias significativas con los otros estados de desarrollo. Los frutos maduros presentaron menor coeficiente de arrastre que los frutos con menor desarrollo, por presentar menor rugosidad en la superficie.

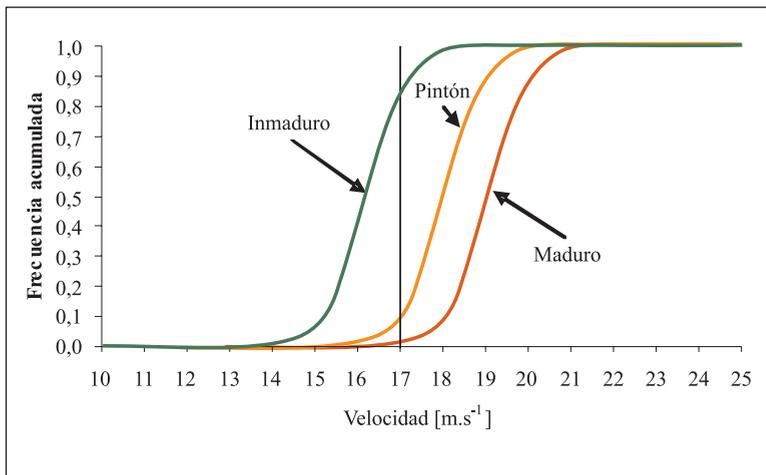


Figura 6. Frecuencias acumuladas de las velocidades terminales para frutos de café en diferentes estados de maduración.

LITERATURA CITADA

1. BILANSKI, W.K.; COLLINS, S.H.; CHU, P. Aerodynamic properties of seed grains. *Agricultural Engineering* 43(4): 216-219. 1962.
2. ESCHENWALD, H.A.; HALL, C. W. Air-flotation, pneumatic conveying velocities and airflow relationships for coffee fruits and coffee beans. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 45(4): 319-332. 1961.
3. MARÇAL, D. Comportamento aerodinâmico de frutos de café. Vicoso, Universidade Federal de Viçosa, 2005.
4. McCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw Hill. 2004. 1176 p.
5. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. Glenn Research Center. On line Internet. Disponible en: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/shaped.html> (Consultado septiembre de 2008).
6. STREETER, V.L.; WYLIE E.B. *Mecánica de los Fluidos*. 8. ed. México, Mc Graw-Hill, 1986. 595 p.