

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE AIREACIÓN EN AIREADORES COMERCIALES

Analysis of the efficiency of aeration in commercial aerals

Juan Esteban Luna Valencia¹

Resumen

Los extractos naturales y compuestos aromáticos nos ofrecen una ventana a la elaboración de productos para necesidades diversas, desde medicinas hasta controladores de pestes y plagas; dependiendo de la necesidad y el tipo de trabajo que se requieran de estos. Para tal fin se obtienen compuestos provenientes de las plantas que permiten combatir una gama amplia de necesidades y además combatir, plagas y vectores generadores de enfermedades en los hogares, con el beneficio de la ayuda y protección al medio ambiente.

Palabras Claves: Aceite Esencial, Extracto, Fermentación, Hidrolato, volátil

¹ Servicio Nacional de Aprendizaje,
Km 38 vía al sur de Neiva. jlunav@
sena.edu.co, Cel: 3136523563

Abstract

One of the main challenges of the aquaculture sector in the department of Huila is the management of operating costs generated by electricity consumption, mainly due to the use of the required equipment for the aeration of tanks and lakes, especially for intensive systems, in which oxygen consumption is higher and a more detailed control of water quality parameters must be done. This article aimed at analyzing the types of aerators used in the departmental aquaculture sector, from the perspective of aeration efficiency, commonly called SAE by its acronym for "Standard efficiency of aeration".

Keywords: Oxygen Transfer, Efficiency in Aeration, Aeration, Costs of Aeration, Aquaculture.

Introducción

La aireación del agua es uno de los procesos más importantes en el desarrollo de actividades acuícolas intensivas, ya que la difusión natural del oxígeno con la superficie del agua y la producción de oxígeno por parte de plantas acuáticas en el proceso de fotosíntesis no es suficiente para contrarrestar el consumo intensivo de oxígeno en el agua (Kumar, Moulick, Singh, & Mal, 2013); esto resulta en que el OD sea uno de los factores más determinantes en el proceso. La Tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*) y roja (*Oreochromis sp.*) son las especies más importantes en el eje productivo acuícola del Huila (Gobernación del Huila, 2007). Las temperaturas cálidas y altamente resistente a bajos niveles de OD, llegan a resistir hasta 0.3 mg l^{-1} (Xu, Liu, Cui, & Miao, 2006); sin embargo, estas concentraciones bajas afectan la ingesta de alimento, la tasa de crecimiento y el gasto de energía destinado a mantener al peso corporal del cuerpo (Tran-duy,

Dam, & Schrama, 2012; Xu et al., 2006). Tran-duy et al., (2012) encontraron que la concentración de OD es inversamente proporcional al factor de conversión de alimento, mientras que la ganancia en peso y la ingesta de alimento aumentaba de manera proporcional al aumento en la concentración de OD, evaluando dichos parámetros en cuatro niveles de OD: i) 1.58 mg l^{-1} , ii) 2.58 mg l^{-1} , iii) 4.06 mg l^{-1} y iv) 6.08 mg l^{-1} en Tilapia nilótica de 197g promedio durante 16 días; evidenciando la importancia de sostener un alto nivel de OD en un sistema productivo.

El sostenimiento del nivel adecuado de OD en la acuicultura intensiva es el principal responsable del aumento de los costos relacionados con el consumo eléctrico, generado principalmente por los equipos de aireación de agua utilizados, en el caso de un sistema productivo sin recirculación de agua. Como dichos equipos varían tanto en forma como en método de aireación, su eficiencia energética es juzgada

mediante un parámetro generalizado como la *aeration efficiency*, (AE); esta se define como la cantidad de oxígeno transferido al agua por unidad de potencia en condiciones de campo, y para efectos de comparación entre aireadores se detalló el *Standard Aeration Efficiency* (SAE), como la cantidad de oxígeno transferida al agua por unidad de potencia y bajo condiciones estándares de temperatura de agua a 20°C, concentración inicial de oxígeno disuelto de 0 mg/L, una atmósfera de presión y agua limpia (Bhuyar, Thakre, & Ingole, 2009).

La importancia de este indicador radica en el nivel de competitividad de cada sistema productivo, entre más alto sea el SAE, menos energía se requerirá para producir el oxígeno requerido en el tanque. El consumo energético para producir 1 kg de Tilapia Nilótica manteniendo un nivel de oxígeno disuelto superior a 6 mg/L utilizando un aireador tipo blower de 135W para un sistema productivo RAS (*Recirculating aquaculture system*) es de 11,22 kWh y en Biofloc de 22,44kWh (Luo et al., 2014). Teniendo en cuenta el costo por kWh del operador eléctrico del departamento para el mes de Marzo del 2017 para un nivel de tensión inferior a 1kV es de \$483,4 COP¹, con esto se deduce que bajo estas circunstancias el costo de producción de 1kg de Tilapia Nilótica sería de \$5.423,7 COP. El precio de venta de 1kg de Tilapia Roja en la central mayorista más importante del país está por \$9.500 COP (Corabastos, 2017). Suponiendo un costo similar de venta entre la Tilapia Nilótica y la Roja el costo eléctrico representaría más del 56% del precio de venta al cliente final.

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, por sus siglas en ingles ASCE, recomiendan un método que ha sido ampliamente usado para la determinación del SAE de los diferentes equipos de aireación, el test se basa en la re-oxigenación por medio del aireador de agua previamente des-oxigenada por sulfito de sodio, durante el funcionamiento del aireador se monitorea el nivel de oxígeno disuelto en sitios representativos del tanque y posteriormente es analizado por un modelo simplificado de transferencia de masa mediante la estimación del coeficiente global de transferencia de oxígeno K_L y la concentración saturada de oxígeno disuelto en estado estacionario C_{∞}^* (ASCE, 2007).

El presente estudio tiene por objetivo revisar documentación técnica y científica y reflexionar sobre la eficiencia de aireación estándar de diferentes aireadores usados en la industria piscícola del departamento del Huila.

Metodología

Análisis teórico

La teoría de tasa transferencia de masa de oxígeno disuelto en un volumen de agua se basa en la variación en la concentración de oxígeno disuelto en el agua como función del tiempo (Cancino, Roth, & Reuß, 2004), y se expresa de la siguiente forma (Fan et al., 2016; Kumar et al., 2013; Lewis & Whitman, 1924):

$$\frac{dC}{dt} = K_L a_t (C_{\infty}^* - C)$$

¹ <http://www.electrohuila.com.co/Portals/0/tarifas/MARZO%202017.pdf>

Despejando el Coeficiente de transferencia global de oxígeno ($K_L a_t$) e integrando con límites inferior y superior de C entre C_0 y C_∞^* y para el tiempo entre 0 y t , obtenemos:

$$K_L a_t = \frac{\ln(C_\infty^* - C_0) - \ln(C_\infty^* - C)}{t}$$

Donde C es la concentración de oxígeno en el agua (mg l^{-1}), C_∞^* concentración de saturación de DO en estado estacionario a medida que el tiempo se aproxima al infinito (mg l^{-1}), C_0 es la concentración inicial (mg l^{-1}), t es el tiempo (h) y $K_L a_t$ el coeficiente de transferencia total de oxígeno (h^{-1}).

Como el parámetro de comparación se hace a condiciones de temperatura estándar, se pueden usar las siguientes ecuaciones para ajustar el coeficiente de transferencia de oxígeno a la temperatura de estudio (ASCE, 2007; Cancino et al., 2004):

$$C_{st}^* = 2234.34(T + 45.93)^{-1.31403}$$

$$k_L a_{Tr} = \frac{k_L a_T}{1.024^{T - T_r}}$$

Tres la temperatura de referencia del método, para el caso del método de la ASCE es de 20°C , T es la temperatura del estudio ($^\circ\text{C}$) y C_{st}^* es la concentración de saturación del oxígeno a la temperatura T (mg l^{-1}).

La ASCE recomienda además aplicar un factor de corrección para la presión (ASCE, 2007)

$$C_{\infty 20}^* = C_\infty^* \left(\frac{1}{\frac{C_{st}^* P_b}{C_{s20}^* P_s}} \right)$$

Donde $C_{\infty 20}^*$ es la concentración de oxígeno disuelto en estado estacionario corregido a 20°C , a presión estándar de 1 atm y humedad relativa del 100%, C_{s20}^* es la concentración de oxígeno disuelto de saturación de la superficie, tabulado a 20°C , a una presión total de 1 atm y 100% de humedad relativa, P_b es la presión barométrica en sitio durante el experimento y P_s es la presión barométrica estándar de 1 atm.

Para obtener el SAE y la *Aeration Efficiency* (AE) es necesario determinar el *Standard Oxygen Transfer Rate* (SOTR) del inglés tasa de transferencia estándar de oxígeno y el *Oxygen Transfer Rate* (OTR) del inglés tasa de transferencia de oxígeno, el primero bajo las condiciones estándares del método antes mencionado y el segundo en las condiciones del experimento.

$$SOTR = k_L a_{20^\circ\text{C}} \cdot C_{\infty 20}^* \cdot \text{Volumen}$$

$$OTR = k_L a \cdot (C_{st}^* - C_0) \cdot \text{Volumen}$$

Y por último se determina el SAE y AE del aireador

$$SAE = \frac{SOTR}{P_{\text{aireador}}}$$

$$AE = \frac{OTR}{P_{\text{aireador}}}$$

Donde P_{aireador} es la potencia consumida por el equipo durante el experimento, generalmente dada en kWh.

Resultados

A continuación se presenta una descripción de algunos aireadores del mercado y su funcionamiento.

Aireador de Aspiración con Hélice

Este equipo aspira el aire atmosférico a través de un eje hueco giratorio que está conectado a un motor eléctrico en un extremo y a una hélice en el otro extremo que se sumerge bajo el agua. La hélice acelera el agua a una velocidad suficientemente alta para provocar una caída de presión sobre la superficie de difusión, esto obliga al aire a pasar a través de un difusor en el eje hueco y entrar en el agua como burbujas finas (Avinash Kumar, S. Moulick, B.C. Mal, 2010). Este tipo de aireador se muestra en la figura 1.



Figura 1. Aireador de aspiración con hélice.
Recuperado de: <http://eurodetox.in/images/EurodetoxInjector.jpg>

La eficiencia estándar de aireación puede variar de acuerdo al ángulo de funcionamiento, de la velocidad de rotación del eje, del diseño de la hélice y del motor usado. Las configuraciones más eficientes varían de fabricante a fabricante (Boyd & Ahmad', 1987; Boyd & Martinson, 1984; Kumar, Moulick, & Mal, 2010).

Bomba Vertical

Consiste en un motor eléctrico sumergido con un impulsor fijo en su eje,

este motor se suspende con flotadores y el impulsor genera chorros de agua en el aire permitiendo la difusión del mismo dentro del agua. Una típica bomba vertical se muestra en la figura 2.



Figura 2. Bomba Vertical en funcionamiento.
Recuperado de: <http://www.ab-aquatics.com/images/fountains/lake-aeration-systems.jpg>

La eficiencia estándar de aireación puede variar de acuerdo al diseño de la hélice y a las características del motor, se pueden encontrar potencias desde 0.33kW hasta superiores a 10kW (Boyd, 1998; Cancino, 2004; Cancino et al., 2004; Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, 2011).

Bomba Tipo Spray

Consiste en una bomba de alta presión que descarga agua a alta velocidad a través de uno o más orificios con el fin de aumentar el área de exposición entre el agua y el aire, para que se presente el efecto de difusión del oxígeno. Este aireador se representa por la figura 3.



Figura 3. Bomba tipo spray en T. Recuperado de: <http://www.ag.auburn.edu/fish/mediagallery/files/2013/08/559.jpg>

La eficiencia de aireación estándar está ligada a la eficiencia del bombeo utilizado y de la geometría del difusor, generalmente equipos con una potencia superior a 7.6kW (Boyd & Ahmad', 1987).

Difusor de Aire

Se trata de una turbomáquina que inyecta aire a baja presión pero alto caudal a través de unos difusores posicionados generalmente en el fondo del tanque. Existen una gran variedad de difusores usados, en donde se incluyen domos cerámicos, tubos porosos, tubos plásticos perforados y rocas difusoras de aire. Cabe resaltar que la eficiencia no solo depende del tipo de turbomáquina usada sino del difusor, cada uno tiene características diferentes.



Figura 4. Domo cerámico en funcionamiento. Recuperado de: <http://www.repicky.com.ar/images/difusor-de-burbuja-fina.jpg>

Los parámetros que afectan el SAE de este tipo de sistemas son numerosos, principalmente intervienen la geometría del difusor (diámetro, longitud, accesorios), la profundidad respecto a la superficie donde esté ubicado el difusor, el diámetro de burbujas generadas por el difusor, la eficiencia de la turbo-máquina, la instalación de la tubería de alimentación de aire y el caudal de aire. Generalmente las empresas proveedoras evalúan el SAE comparado al diámetro de la tubería, la profundidad respecto a la superficie y el caudal de aire (*Independent performance tests*, n.d.; Xylem, n.d.)

Aireador de Paletas

Consiste en un moto-reductor soportado con flotadores que es acoplado a unas paletas con el fin de golpear el agua de manera que se genere un efecto de salpicadura de agua, haciendo que se genere una difusión entre el agua y el oxígeno del aire. Un aireador típico se representa en la figura 5.



Figura 5. Aireador típico de paletas. Recuperado de: <http://acuagranja.com.co/wp-content/uploads/2015/08/AIREADORDEPALETAS.jpg>

Al igual que los demás aireadores las diferencias geométricas y mecánicas entre cada equipo hacen que de igual manera el SAE varíe, a nivel de geometría de los álabes varían el diámetro, la profundidad a la cual se sumergen, el ancho y mecánicamente varían respecto a revoluciones por minuto y en potencia entregada y consumida (Boyd & Ahmad', 1987). Se han hecho estudios donde evalúan la eficiencia estándar de aireación variando la velocidad de rotación de los álabes y para tres tipos de aireadores de paletas Taiwaneses

encontrando que la velocidad de rotación donde se encuentra el mayor nivel de eficiencia es diferente para cada aireador (Peterson & Walker, 2002)

Difusor de Microburbujas

Tiene un funcionamiento exactamente igual al difusor de aire, salvo porque los difusores están diseñados para inyectar aire mediante burbujas más finas, es decir, aumentando el área de contacto entre el aire y el agua. La figura 6 representa este mecanismo.

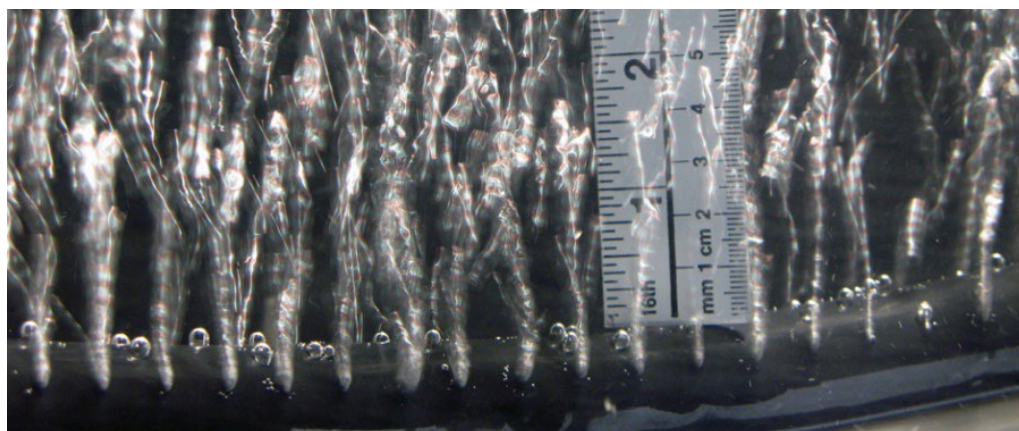


Figura 6. Tubería de micro-burbuja en funcionamiento. Recuperado de: <https://canadianpond.ca/bubble-tubing-fine-bubble-linear-diffuser/#fine>

Las eficiencias estándar de aireación de estos aireadores se resumieron en la Tabla 1.

Compilación de eficiencias de diferentes aireadores			
Aireador	SAE (kg O ₂ /kWh) Promedio ^a	SAE (kg O ₂ /kWh) Rango ^b	Referencia
Aireador de Aspiración con hélice	--	1,73-1,91	(Boyd & Martinson, 1984)
	--	0,73 – 1,52	(Boyd & Ahmad', 1987)
	1,58	1,28-1,825	(Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, 2011)
Bomba Vertical	1,4	0,67- 1,82	(Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, 2011)
	--	0,73-1,52	(Boyd & Ahmad', 1987)
Bomba Tipo Spray	--	1,34-1,41	(Boyd & Martinson, 1984)
	1,28	0,91-1,886	(Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, 2011)
Difusor de aire	1,18	--	(Boyd & Martinson, 1984)
	0,91	0,67-1,21	(Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, 2011)
Aireador de Paletas	2,19	1,095-2,98	(Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, 2011)
Difusor de micro- burbujas	--	3-5,9	(Ovezea, 2009)
	--	2,5-8	(Xylem, n.d.)
	--	2.07-5,72	(Independent performance tests, n.d.) ¹

Resumen de las eficiencias estándar de aireación de seis tipos de aireadores diferentes, a) representa el promedio de eficiencia de cada tipo de aireador y

b) representa el rango encontrado por los autores de eficiencia en diferentes configuraciones y marcas.

Conclusiones

Se evidencia que la tecnología más eficiente es la que poseen los difusores de microburbujas, permitiendo alcanzar hasta 8 kg O₂/kWh, pero se tiene que tomar en consideración que las eficiencias máximas se encuentran en configuraciones específicas de funcionamiento, aparte del tipo y proveedor del equipo, por este motivo se debe tener en cuenta que estas eficiencias varían según otros parámetros, como el diámetro de la tubería, la profundidad de inmersión o el caudal de aire suministrado, lo que hace necesario hacer un estudio más detallado a la hora de tomar una decisión en un sistema productivo con el fin de establecer un sistema eficiente de acuerdo a los parámetros requeridos por la instalación productiva. La ventaja que cuenta esta tecnología es que permite una difusión de oxígeno desde el fondo del agua, garantizando un nivel homogéneo en cada altura del tanque y aprovecha la presión hidrostática del agua para mejorar la transferencia, además de contar con una excelente área de difusión entre el aire y el agua.

Se debe ser muy cuidadoso a la hora de tomar una decisión, tratando en lo posible de verificar los valores especificados en la ficha técnica mediante el debido soporte técnico realizado al equipo. Durante el desarrollo de la investigación se encontraron muchas inconsistencias a la hora de calcular el consumo energético de los equipos en algunas empresas.

Este estudio no tuvo en cuenta los costos iniciales generados en la compra e instalación de cada tipo de aireador ni tampoco el mantenimiento

y la depreciación de dichos equipos, elementos igualmente importantes a la hora de tomar una decisión. Además de los factores económicos cabe resaltar que algunos equipos de aireación tienen definida un área de impacto de aireación, es decir, aireadores como el de paletas o el tipo Splash tienen un área de cobertura limitada de actuación, mientras el aireador de aspiración con hélice actúa en todo el tanque donde se instale ya que el mismo equipo genera una circulación de agua dentro del tanque.

Referencias Bibliográficas

- ASCE. (2007). *Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water* (ASCE/EWRI). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784408483>
- Bhuyar, L. B., Thakre, S. B., & Ingole, N. W. (2009). Design characteristics of Curved Blade Aerator with aeration efficiency and overall oxygen transfer coefficient and comparison with CFD modeling, 1(1), 1–15.
- Boyd, C. E. (1998). Pond water aeration systems Boyd, 18(February), 9–40.
- Boyd, C. E., & Ahmad, T. (1987). EVALUATION OF AERATORS FOR CHANNEL CATFISH CHANNEL.
- Boyd, C. E., & Martinson, D. J. (1984). EVALUATION OF PROPELLER-ASPIRATOR-PUMP AERATORS, 36, 283–292.
- Cancino, B. (2004). Design of high

- efficiency surface aerators: Part 2. Rating of surface aerator rotors. *Aquacultural Engineering*, 31(1–2), 99–115. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.003>
- Cancino, B., Roth, P., & Reuß, M. (2004). Design of high efficiency surface aerators: Part 1. Development of new rotors for surface aerators. *Aquacultural Engineering*, 31(1–2), 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.002>
- Corabastos. (2017). Boletín Diario de Precios. Retrieved August 8, 2017, from <http://www.corabastos.com.co/sitio/historicoApp2/reportes/BoletinDescarga.php>
- Fan, H., Qi, L., Liu, G., Zhang, Y., Fan, Q., & Wang, H. (2016). Aeration optimization through operation at low dissolved oxygen concentrations: Evaluation of oxygen mass transfer dynamics in different activated sludge systems. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.08.008>
- Gobernación del Huila. (2007). *Agenda Interna del Huila para la productividad y la competitividad*. Retrieved from <http://www.huila.gov.co/documentos/OficinaCompetitividad/LIBROAgendaInterna.pdf>
- Independent performance tests*. (n.d.). Retrieved from <http://canadianpond.ca/wp-content/uploads/2014/02/Bubble-Tubing-independent-performance-test-report-metric-2.pdf>
- Kumar, A., Moulick, S., & Mal, B. C. (2010). Performance evaluation of propeller-aspirator-pump aerator. *Aquacultural Engineering*, 42(2), 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.12.001>
- Kumar, A., Moulick, S., Singh, B. K., & Mal, B. C. (2013). Design characteristics of pooled circular stepped cascade aeration system. *Aquacultural Engineering*, 56, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.004>
- Lewis, W. K., & Whitman, W. G. (1924). Principles of Gas Absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, 16(12), 1215–1220. <https://doi.org/10.1021/ie50180a002>
- Luo, G., Gao, Q., Wang, C., Liu, W., Sun, D., Li, L., & Tan, H. (2014). Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor bio floc system, 423, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.023>
- Oakes, Perry L.; Gullett, Kale; Bobowick, T. (2011). *Technical Note No. AEN-3 Aeration of Ponds Used in Aquaculture*. Retrieved from <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=34100.wba>
- Ovezea, A. (2009). Saving energy: Using fine bubble diffusers. *Filtration and Separation*, 46(1), 24–27. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(09\)70088-6](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(09)70088-6)
- Peterson, E. L., & Walker, M. B. (2002).

Effect of speed on Taiwanese paddlewheel aeration. *Aquacultural Engineering*, 26(2), 129–147. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00009-2)

Tran-duy, A., Dam, A. A. Van, & Schrama, J. W. (2012). Feed intake , growth and metabolism of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in relation to dissolved oxygen concentration, 730–744. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02882.x>

Xu, J., Liu, Y., Cui, S., & Miao, X. (2006). Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision, 35, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.02.004>

Xylem. (n.d.). *Aeration products FOR ENERGY-EFFICIENT BIOLOGICAL TREATMENT*. Retrieved from <https://www.xylem.com/siteassets/brand-specific-content-including-catalog/sanitaire/sanitaire-resources/460-sanitaire-difussers.jetaerators.blowers-aeration12.pdf>

NOTA: Es vital revisar las citas en cuanto a menor de 40 palabras – mayor de 40 palabras.

(Footnotes)

1 La empresa Canadianpond.ca evaluó su producto Bubble Tubing™ en diámetros de ½ y ¾ de pulgada a diferente profundidad y caudal de salida de aire.