

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**EFFECTO COMBINADO DE VIENTO Y OLAS EN LA TRANSFERENCIA DE
OXÍGENO EN UN CUERPO DE AGUA**

**NATALIA MARTÍNEZ B.¹
ALDO TAMBURRINO T.²**

RESUMEN

Se presentan los resultados de un estudio experimental de la transferencia de oxígeno a través de la superficie libre del agua contenida en un estanque, el que se encuentra acoplado a un túnel de viento. La acción del viento y el movimiento de un bateolas que genera ondas superficiales gravitacionales, inciden en la tasa de reaeración. La tasa de transferencia de oxígeno depende tanto de la frecuencia y características geométricas de las olas (caracterizadas por el valor cuadrático medio de la amplitud y de la pendiente) como de un número de Reynolds asociado a ellas. La característica de onda gravitacional de las olas hace necesario que también se incluya en el análisis la aceleración de gravedad. A partir de un análisis dimensional se encuentra la relación funcional entre la tasa de renovación de la superficie y los parámetros involucrados en la dinámica del flujo, lo que permite obtener una expresión funcional para el coeficiente de transferencia, expresión cuyos parámetros se ajustan buscando un colapso de los datos experimentales.

¹Estudiante Magíster Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. natmarti@ing.uchile.cl

²Profesor Asociado. Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. atamburr@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de los cuerpos de agua depende fuertemente de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en él. Ya sea por causas naturales o antropogénicas puede generarse un déficit de OD, induciéndose un flujo de oxígeno desde la atmósfera a través de la interfase aire-agua. De este modo, resulta importante conocer la tasa a la que se produce esta transferencia, con el objeto de poder predecir la capacidad que tiene el cuerpo de agua para recuperar niveles adecuados de OD. Este proceso de transferencia se conoce como reaeración y es frecuente que se dé con la presencia de oleaje generado por el viento. Aunque es sabido que la presencia de estas olas influencia la transferencia de oxígeno a través de la interfaz aire-agua, aún no está bien definida la dependencia de esta transferencia con las variables relevantes del problema, como lo son el esfuerzo de corte inducido por el viento, las características del oleaje, el nivel de turbulencia, etc. En el presente artículo se presenta algunos resultados obtenidos en un estudio experimental en desarrollo, en el que se investiga el efecto combinado de la acción del viento sobre la superficie libre y la presencia de ondas generadas mecánicamente en la transferencia de oxígeno a través de la superficie libre. Con esta superposición de efectos se busca salvar una de las limitaciones de los estudios desarrollados en túneles de viento, los que por sus dimensiones no permiten un completo desarrollo de las olas generadas exclusivamente por el flujo de aire.

2. ANTECEDENTES PREVIOS

El efecto del viento en la reaeración de cuerpos de agua ha sido objeto de estudios tanto en laboratorio como en terreno. Lo más común es que el coeficiente de transferencia de oxígeno, o coeficiente de reaeración, k_L , se ligue con una velocidad del viento medida a una distancia arbitraria del terreno (usualmente 10 m) (por ejemplo, Banks, 1975; Mattingly, 1977; Plate and Friedrich, 1983; Wanninkhof, 1992; Crusius y Wanninkhof, 2003, Wanninkhof et al., 2009) o se relacione con la velocidad media del aire cuando se trabaja con un túnel de viento (Zappa et al., 2001). Con el objeto de evitar la arbitrariedad de estas velocidades, otras investigaciones emplean la velocidad friccional del viento (Komori et al., 1993; Peirson et al., 2007; Chu and Jirka, 1995; Tamburrino et al., 2007; Tamburrino y Rayo, 2010). El efecto de las olas generadas por el viento ha sido estudiado, por ejemplo, por Eloubaidy y Plate (1972), Jähne et al. (1987), Frew et al. (2004), Peirson et al. (2007), Tamburrino y Rayo, 2010), etc. La acción de olas generadas mecánicamente en el coeficiente de transferencia ha sido abordado por Daniil y Gulliver (1991). Jähne et al. (1984, 1987) determinaron la importancia de las ondas gravitacionales en el proceso de transferencia, estableciendo que el valor cuadrático medio de la pendiente de las olas, s_{rms} , era un buen parámetro para caracterizar k_L . También en esta línea, Rayo y Tamburrino (2010) y Rayo (2010), relacionan la transferencia de oxígeno con s_{rms} , para un fetch limitado, en el que no se lograba un completo desarrollo de las olas. Con el objeto de superar la limitación que impone la longitud del fetch en los estudios de laboratorio, los experimentos de Peirson et al. (2007) contemplaron la superposición de olas generadas mecánicamente con viento, de manera similar al estudio que se presenta en este artículo. De este modo, la perturbación debida al viento incorpora ondas de microescala sobre las ondas principales, asemejando más el fenómeno al que ocurre en la naturaleza.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La instalación experimental consiste en un estanque de sección cuadrada de 50 cm de lado con una longitud de 4 metros. Adosado a éste se tiene un túnel de viento de 8 metros de largo antes de llegar al estanque. El túnel funciona con un ventilador centrífugo Airolite modelo VCL 085 que permite velocidades medias entre 1 a 15 m/s. Adicionalmente se encuentra instalada una paleta mecánica en la sección de más aguas arriba del estanque, la que permite generar ondas monocromáticas de distintas alturas y frecuencias. Para evitar el reflejo de las ondas al final del estanque, se instaló una playa de acrílico perforado la que además sirve para disminuir altamente el quiebre de las ondas.

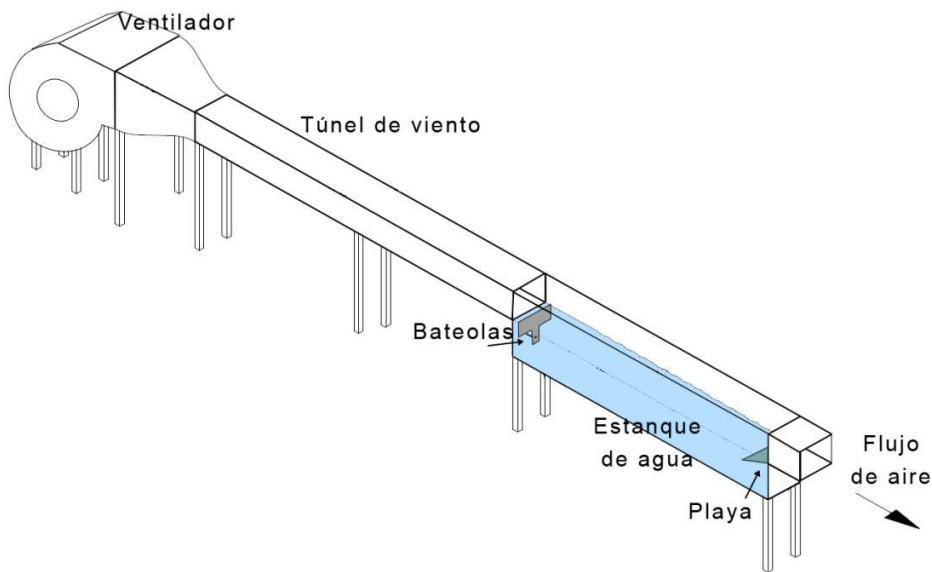


Figura 1. Esquema de la instalación experimental.

La velocidad del viento se caracterizó midiendo los perfiles de viento en el eje del estanque en 4 posiciones (0.8, 1.6, 2.4 y 3.2 m desde el inicio). Esto se efectuó con un anemómetro de hilo caliente marca Extech modelo 407123, el que registra datos con una frecuencia de 0.5 Hz. Para la medición de la elevación de la superficie libre y su pendiente se cuenta con dos instrumentos de cables capacitores modelos Wave Height Gauge WG-50 marca RBR, que permiten registrar una serie de tiempo de la elevación en dos puntos. La máxima cercanía posible sin que se interfieran las señales es de 6 mm lo que permite buenas mediciones (Rayo, 2010). Se registraron 2 series de tiempo de 5 minutos cada una aproximadamente, en las mismas ubicaciones donde se registró el viento. Así mismo, se calibraron dichos cables antes y después de cada experiencia. La medición del oxígeno disuelto en el cuerpo de agua se realizó con un sensor Oxygen Sensor TriOximatic 300 que registra la información a una tasa de 1 segundo. Éste se dispuso en el centro del estanque aceptándolo como el punto representativo del cuerpo de agua. Antes de cada experimento, el agua del estanque se desoxigenó con 90 gr de sulfito de sodio. El coeficiente de transferencia de OD se determinó ajustando la expresión:

$$\ln \left(\frac{C_{sat} - C(t)}{C_{sat} - C(0)} \right) = -\frac{k_L}{h} t \quad (1)$$

donde C_{sat} es la concentración de saturación del oxígeno en agua, $C(0)$ es la concentración inicial de OD, $C(t)$ es la concentración en un tiempo t y h es la profundidad del estanque. Se midió la transferencia de oxígeno y las características de elevación y de flujo de viento para condiciones tanto de viento o de ondas mecánicas como únicos forzante de la capa superficial, así como cuando se tiene el efecto combinado de ambos. Las velocidades medias de viento con las que se trabajó fueron de 3,6; 6,6; 7,9; 9,1 y 11,1 m/s mientras que las ondas generadas mecánicamente tenían amplitudes del orden del centímetro y frecuencias de 1, 2 y 3 Hz. En la Tabla 1 se resumen las condiciones experimentales, básicamente la velocidad media del viento en el túnel, \bar{u} , y la frecuencia de ondas generadas mecánicamente, f_m . En cada experiencia se determinó la temperatura media del agua, T , la que se utilizó para determinar su viscosidad cinemática, ν , y el coeficiente de difusión del oxígeno en el agua, D .

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de la información básica, perfiles de velocidad media del viento y series de tiempo del nivel de la superficie libre y su pendiente, se determinó la velocidad friccional, (u_*) y los valores cuadrático medio del nivel y su pendiente, η_{rms} y s_{rms} , respectivamente. Del espectro de densidad de energía del nivel de la superficie libre se determinó la frecuencia para la cual el espectro es máximo, f_p . El coeficiente de transferencia, determinado a partir de la Ec. 1, se estandarizó a 20°C (k_{20}), mediante la relación de Arrhenius. Los resultados de los cálculos se sintetizan en la Tabla 1, en la que se incluye también el número de Schmidt ($Sc = D/\nu$).

De acuerdo a la teoría de la renovación de la superficie de Dankwerts (1951), el coeficiente de transferencia depende del coeficiente de difusión, D , y la tasa de renovación, r . Consideraciones dimensionales indican que la relación es

$$k_L \sim \sqrt{Dr} \quad (2)$$

La tasa de reaeración engloba la dinámica del flujo en la cercanía de la superficie libre. De este modo, deberá depender de la velocidad friccional del viento (u_*), las características del oleaje, representados por f_p , η_{rms} y s_{rms} , así como la viscosidad. Reconociendo la relevancia de la presencia de ondas gravitacionales en la tasa de transporte como lo estableció Jähne et al. (1984, 1987), también se incluye la aceleración de gravedad, g . De este modo, se establece la relación funcional:

$$\frac{r}{f_p} = \Phi \left(\frac{u_*}{f_p \eta_{rms}}, s_{rms}, \frac{\eta_{rms}^2 f_p}{\nu}, \frac{g \eta_{rms}^3}{\nu^2} \right) \quad (3)$$

El último término del funcional Φ es una medida de la razón entre el efecto gravitacional y el viscoso en la cercanía de la interfaz aire-agua y el tercero corresponde a un número de Reynolds, $Re = \eta_{rms}^2 f_p / \nu$. Se propone:

$$\frac{r}{f_p} = \frac{g \eta_{rms}^3}{\nu^2} \Phi_1 \left(\frac{u_*}{f_p \eta_{rms}}, s_{rms}, Re \right) \quad (4)$$

Tabla 1. Resumen de las condiciones experimentales y principales resultados.

EXP.	\bar{u} m/s	u_* m/s	f_m Hz	f_P Hz	T °C	ν $\times 10^6$ m ² /s	D $\times 10^9$ m ² /s	Sc	η_{rms} mm	s_{rms}	k_{20} cm/hr
1	3,6	0,14	-	5,5	13,3	1,197	1,593	751	0,1	0,027	0,8
2	6,6	0,34	-	7,2	14,3	1,166	1,652	705	1,2	0,097	7,0
3	7,9	0,43	-	6,2	13,2	1,200	1,587	755	2,1	0,118	8,1
4	9,1	0,41	-	5,5	9,2	1,340	1,374	974	2,7	0,115	9,7
5	11,1	0,75	-	4,5	11,1	1,270	1,471	863	4,2	0,139	19,1
6	0,0	0,0	1	1,0	10,6	1,288	1,441	895	3,2	0,031	1,5
7	0,0	0,0	2	2,0	12,2	1,233	1,531	804	3,7	0,062	1,8
8	0,0	0,0	3	2,6	11,7	1,250	1,501	832	2,9	0,045	0,9
9	3,6	0,16	1	1,0	9,9	1,313	1,406	934	2,8	0,069	4,7
10	6,6	0,40	1	1,4	10,4	1,295	1,433	904	4,1	0,105	16,6
11	7,9	0,43	1	1,0	10,8	1,281	1,455	879	5,6	0,115	24,2
12	9,1	0,60	1	2,0	11,3	1,263	1,481	852	6,2	0,135	32,4
13	11,1	0,95	1	2,1	11,9	1,243	1,512	822	7,9	0,152	48,5
14	3,6	0,18	2	2,0	12,8	1,213	1,560	779	4,0	0,077	5,7
15	6,6	0,29	2	2,0	12,9	1,210	1,566	773	5,4	0,099	15,8
16	7,9	0,37	2	2,0	12,7	1,216	1,555	783	5,8	0,107	15,3
17	9,1	0,54	2	2,0	11,4	1,260	1,483	851	6,1	0,119	29,4
18	11,1	0,87	2	2,0	12,1	1,236	1,524	811	9,0	0,136	52,4
19	3,6	0,14	3	3,0	9,7	1,321	1,396	946	3,3	0,066	3,6
20	6,6	0,25	3	3,0	9,8	1,317	1,403	937	5,2	0,103	6,9
21	7,9	0,35	3	3,0	10,7	1,284	1,449	886	5,6	0,113	18,1
22	9,1	0,60	3	3,0	9,9	1,313	1,406	935	7,3	0,132	20,1
23	11,1	0,92	3	3,0	11,4	1,260	1,486	848	8,3	0,141	32,2

De este modo, el coeficiente de reaeración queda:

$$k_L \sim \sqrt{D f_P \frac{g \eta_{rms}^3}{\nu^2} \Phi_1} \quad (5)$$

Reordenando:

$$k_L \sim \sqrt{\frac{D}{\nu} \eta g \frac{f_P \eta_{rms}^2}{\nu} \Phi_1} \quad (6)$$

$$k_L \sim Sc^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\eta g Re \Phi_1} \quad (7)$$

$$\frac{k_L}{\sqrt{g \eta_{rms}}} Sc^{\frac{1}{2}} \sim \sqrt{Re \Phi_1} \quad (8)$$

Considerando los resultados de Jähne et al. (1984, 1987) así como los de Tamburrino y Rayo (2010), es posible postular que $\sqrt{\Phi_1} \sim s_{rms}^2 \sqrt{Re \Phi_2}$, donde el funcional Φ_2 depende de Re y $u_*/(f_P \eta_{rms})$. Se propone $\sqrt{\Phi_2} = Re^\alpha \Psi$, donde Ψ es función sólo de $u_*/(f_P \eta_{rms})$. Luego, la relación (8) queda:

$$\frac{k_L}{\sqrt{g\eta_{rms}}} Sc^{\frac{1}{2}} = F(Re^\beta s_{rms}^2 \Psi) \quad (9)$$

La función Ψ debe ser tal que se comporte de manera “razonable” para valores característicos de $u_*/(f_P \eta_{rms})$, sin indeterminarse ni anularse. Si no hay viento ($u_* = 0$), y sólo el efecto del oleaje mecánico es responsable de la transferencia a través de la interfaz, entonces k_L debe depender sólo de las características de las olas (además de D y ν) por lo que Ψ toma un valor constante, arbitrariamente igual a 1. En el otro extremo, cuando no existen ondas mecánicas y sólo el viento es el responsable de la renovación de la superficie, la frecuencia y amplitud de las olas son el resultado exclusivo de u_* y la función Ψ debe tomar un valor finito. Con estas consideraciones, se propone:

$$\Psi = \left[1 + a \left(\frac{u_*}{\eta_{rms} f_P} \right)^n \right]^m \quad (10)$$

donde a , n y m son parámetros que deben ajustarse a partir de la información experimental, al igual que β . Los datos experimentales se presentan en la Fig. 2. El mejor ajuste se consigue cuando los parámetros toman los siguientes valores: $\beta = 1$; $a = 0,1$; $n = 1,5$ y $m = 2$. La recta de la Fig. 2 corresponde a relación que define al coeficiente de transferencia en términos de las distintas variables involucradas, la que está dada por:

$$\frac{k_{20}}{\sqrt{g\eta_{rms}}} Sc^{\frac{1}{2}} = 0,00135 [Re s_{rms}^2 \Psi]^{0,275} \quad (11)$$

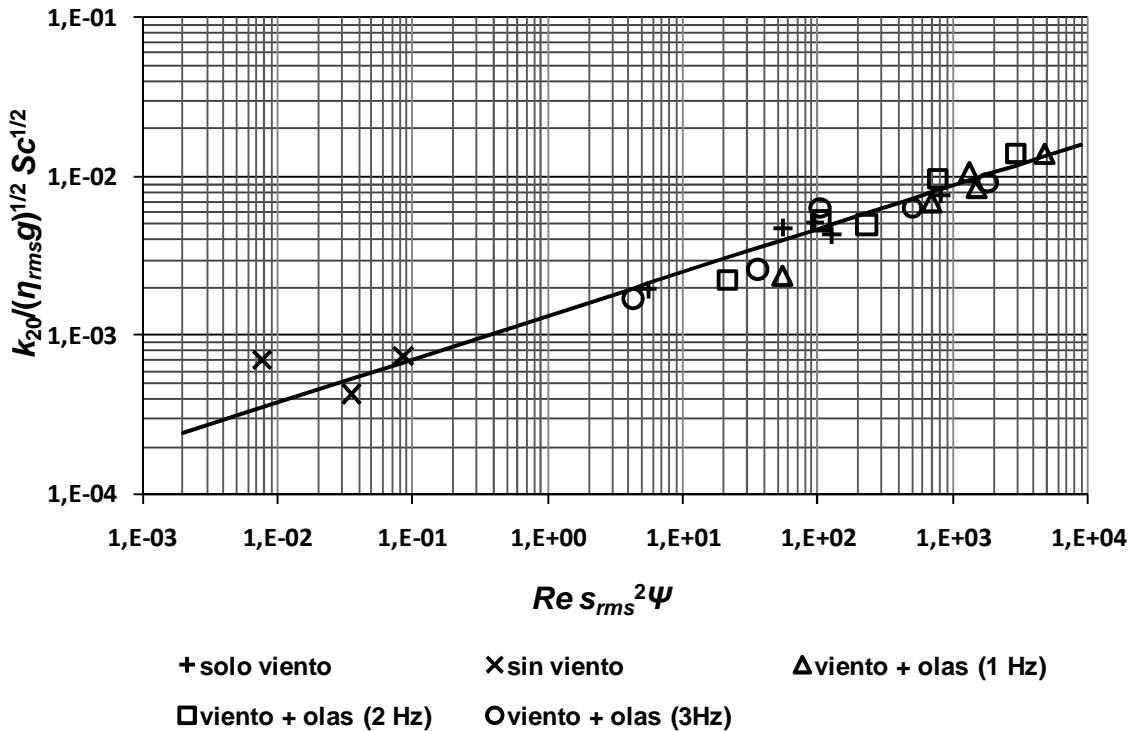


Figura 2. Análisis adimensional de la tasa de reaeración en función de características de la superficie libre.

5. CONCLUSIONES

Como se ha determinado en investigaciones previas, la pendiente cuadrática media de las olas presentes en el cuerpo de agua es una de las variables relevantes en el proceso de transferencia de oxígeno a través de la interfaz aire-agua. Los resultados experimentales también avalan la dependencia del coeficiente de transferencia con el valor cuadrático medio de la amplitud de las olas. La presencia de ondas gravitacionales demanda también que la tasa de reaeración presente una dependencia con la aceleración de gravedad. Adicionalmente, esta tasa también depende de las propiedades geométricas y frecuencia de las olas, así como la viscosidad del fluido. La tasa de renovación de la superficie depende funcionalmente de las variables que controlan la dinámica del flujo en la cercanía de la interfaz aire-agua y a su vez define al coeficiente de transferencia. El buen colapso de los datos experimentales logrado con las variables adimensionales derivadas del análisis válida los supuestos hechos en el estudio.

6. REFERENCIAS

- Banks R. (1975), "Some features of wind action on shallow lakes", J. of Environmental Engineering Division, octubre, pp. 813 – 827.
- Chu, C. R. and G. H. Jirka. (1995) " Reaeration in combined wind/stream driven flows", In B. Jähne and E. C. Monahan (eds.), Air-Water Gas Transfer. AEON Verlag and Studio, Hanau, Germany, pp. 79-88.

Crusius J., and R. Wanninkhof (2003) "Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 48, No. 3, pp. 1010–1017.

Daniil, E. and J. S. Gulliver. (1991) Influence of waves on air-water gas transfer. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 117, No.5, pp. 522-540.

Dankwerts (1951) "Significance of liquid film coefficients in gas adsorption", *Ind. Engrg, Chem.* Vol. 46, No. 6, pp. 1460-1467.

Eloubaidi A.F. and Plate E.J. (1972) "Wind-shear turbulence and reaeration coefficient", *J. Hyd. Div.*, ASCE, 98, HY1, pp. 153-170.

Frew N.M., Bock E.J., Schimpf U., Hara T., Haußecker H., Edson J.B., McGillis W.R, Neloson R.N., McKenna S.P., Uz B.M. and Jähne B., (2004) "Air-sea gas transfer: Its dependence on wind stress, small-scale roughness and surface films" *J. Geophys. Res.*, Vol 109, paper C08S17

Jähne B., Munich K. O., Bosinger R., Dutzi A., Huber W. and Libner P. 1987, On the parameters influencing air-water gas exchange, *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, pp.1937-1949.

Komori S., Nagaosa R., Murakami Y. (1993), "Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence", *J. Fluid Mech.*, vol. 249, pp.161-183.

Mattingly, G.E. (1977) "Experimental study of wind effects on reaeration" *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 103, No. HY3, pp. 311-323.

Peirson, W.L., Walker J.W., Welch CH. and Banner M.L., (2007) "Defining the enhancement of air-water interfacial oxygen exchange rate due to wind-forced microscale waves". In *Transport at the Air Sea Interface*, Christoph S. Garbe, C.S., Handler R.A & Jähne1, B (Editors), 117-129

Plate E., Friedrich R. (1984), "Reaeration of open channel flow", en *Gas Transfer at Water Surfaces*, W. Brutsaert y G. Jirka, D. Reidel, Hingham, pp. 333 – 346.

Rayo, L. (2010) Efecto de las ondas superficiales generadas por viento en la transferencia de oxígeno de un cuerpo de agua. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Tamburrino, A., Rayo, S. and Niño Y. (2007), "Wind and water-turbulence effects on the reaeration coefficient in a water body", *Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics, ISEH V*, Tempe, Arizona, Dec. 4-7.

Tamburrino A., and Rayo L. (2010) "Effect of the slope of short fetch wind-driven waves on the oxygen transfer in a water body", *Sixth International Symposium on Environmental Hydraulics, ISEH VI*, Athens, Greece, June 23-25

Wanninkhof R. (1992) "Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean", *J. Geoph. Research*, vol. 97, no. c5, pages 7373-7382,

Wanninkhof R., Asher W.E., Ho D.T., Sweeney C, McGillis W.R. (2009) “Advances in Quantifying Air-Sea Gas Exchange and Environmental Forcing”. Annual Review of Marine Science, 1: 213-44.

Zappa C., Asher W., Jessup A. (2001), “Microscale wave breaking and air – water gas transfer”, J. of Geophysical Research, vol. 106, Paper C5, pp. 9385-9391.