



TIERRAS, GEOMORFOLOGÍA Y RECURSOS NATURALES



UTILIZACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA EL ESTUDIO DE UN ECOSISTEMA LACUSTRE

*Marisa G. Cogliati**
*Claudia Palese**
*Jorge L. Lässig**

Introducción

La distribución de sustancias disueltas, nutrientes, microorganismos y plancton es influenciada por la circulación del agua en los lagos, por lo que el adecuado conocimiento de los movimientos del agua adquiere importancia en la caracterización de ecosistemas lacustres ya que además, inciden en la distribución del calor entre las distintas capas del lago. Una de las características más importantes del lago es su estructura térmica. El contenido de calor del cuerpo de agua es de vital importancia en los estudios de la calidad de agua en lagos. El metabolismo y el comportamiento de los organismos acuáticos están directamente relacionados con la temperatura del agua.

La estructura vertical de los lagos templados describe físicamente por sus características térmicas en tres regiones: una capa superior de agua más cálida (epilimnio) donde prevalecen los procesos de fotosíntesis, el hipolimnio, que es la capa más profunda y fría, menos afectada por el viento, y el metalimnio o termoclina que es la capa intermedia. La temperatura disminuye hacia mayores profundidades. En los lagos templados, estratificados, aproximadamente el 85% de la producción primaria ocurre en el metalimnio. El balance de agua en un lago, generalmente depende de los flujos de ingreso y egreso de agua, del contenido de agua del suelo, de la precipitación y la evaporación sobre la superficie libre del lago. El viento, la radiación solar, la estratificación, la rotación de la tierra, inducen las fuerzas causantes de los movimientos del agua en los lagos.

En este trabajo se presenta la distribución espacial de la temperatura de la superficie del agua del lado argentino del lago Buenos Aires en la provincia de Santa Cruz obtenida por medio de una aproximación a la ecuación dinámica de la temperatura de superficie en lagos templados resuelta utilizando la temperatura de superficie observada por el sensor AVHRR² de los satélites NOAA³.

* Marisa G. Cogliati es investigadora del Departamento de Geografía de la Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Comahue (e-mail: cogliati@uncoma.edu.ar); Claudia Palese y Jorge L. Lässig son investigadores del Departamento de Mecánica Aplicada. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue.

² Advanced very high resolution radiometer

³ National Oceanic and Atmospheric Administration

El lago es binacional, denominándose Lago Buenos Aires en Argentina y General Carrera en su lado chileno, su superficie total es de 2240 km² es el segundo lago más extenso de Sudamérica. El lado argentino comprende 881 km².

En consecuencia de lo que se ha epresado, se ha analizado la factibilidad de la determinación del patrón de flujo del agua superficial del lago bajo la influencia del viento, a partir del campo térmico superficial, obtenido utilizando para ello la temperatura de brillo de los canales 4 y 5 del satélite.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue cuenta con una estación de recepción de imágenes de satélites meteorológicos y en ella se llevan a cabo estudios, de aplicación en hidrología de superficie utilizando sensores remotos, entre otros. Esta información, obtenida por los satélites meteorológicos, posee una resolución espacial relativamente pobre (1.1 km), pero una muy buena resolución temporal, debido a que existen varios satélites en órbita pudiéndose obtener imágenes sucesivas a intervalos cortos. Esa característica permite que se puedan observar fenómenos que varían en el tiempo. También tienen alta resolución radiométrica y resolución espectral adecuada para estudios de hidrología, como los efectuados para la región del Comahue (Lässig y otros, 1999)⁴ (Lässig y otros 2002)⁵ (Lässig y Palese, 2002)⁶.

Una aplicación de interés consiste en la observación del campo de temperatura de cuerpos de agua e indirectamente a partir de éstos, los campos de movimiento superficial del agua. El viento, por su parte, es un forzante natural. La ocurrencia de vientos persistentes produce una tensión superficial que provoca el movimiento de la superficie del agua y una mezcla entre el estrato superior (epilimnio) y la zona más profunda (hipolimnio) del lago (Overbeck, 1989)⁷. Si se plantean asociaciones entre los campos superficiales de temperatura y velocidad del agua y el perfil térmico que se mide en el lago, se puede inferir una aproximación al patrón de movimiento tridimensional del agua dentro del lago, pudiendo ser aplicados estos resultados en estudios de ventilación profunda y su relación con la dinámica del ecosistema lacustre y litoral.

El campo de velocidades superficiales del agua se obtiene indirectamente a través del análisis de las variaciones térmicas superficiales medidas con imágenes satelitales sucesivas. Así, en este trabajo, el objetivo es obtener una primera aproximación

⁴ Lässig, J. L., Flores, L.A., Bastanski, M.A. and Palese, C., (1999) Monitoreo de espejos de agua en la región Comahue, Congreso Argentino de las Grandes Presas y Aprovechamientos hidroeléctricos 1999, San Martín de los Andes, Argentina, 411-416.

⁵ Lässig J.L., Palese C. y Bastanski, M.A., (2002) Lake Mari Menuco (Argentina): Superficial water flow pattern due wind stress, analysis and studies using ir NOAA -AVHRR imagery, 29 ISRSE International Symposium on Remote Sensing of Environment, Buenos Aires, Argentina.

⁶ Lässig J.L. y Palese C., (2002) Flujo superficial de agua del complejo Cerros Colorados en base a imágenes AVHRR-NOAA, Foro Virtual Semana de la Ingeniería 2002 "Jornadas de Teleobservación Satelital de la Tierra", CAI Centro Argentino de Ingenieros, Buenos Aires, Argentina, 23-27.

⁷ Overbeck, J., (1989), Conceptos sobre ecosistemas. Directrices para la gestión de lagos. Jorgensen y Vollenweider Ed., International Lake Environmental Committee Foundation, Japón, 1.(2):9-26.

al patrón de flujos superficiales del agua del lago Buenos Aires debidos al viento, por medio del análisis de imágenes NOAA-AVHRR^{3,4}, para realizar posteriores estudios tendientes a comprender los procesos físicos que se dan en el lago y su interrelación con el ecosistema lacustre y con su entorno.

Metodología

Características de los lagos templados

La estructura y función de los ecosistemas acuáticos es una materia importante en la gestión de lagos. Los componentes bióticos y abióticos de un ecosistema de agua dulce dependen en gran medida de la distribución de la temperatura y de la incidencia de la luz con la profundidad.

En los lagos templados, como es el caso del Lago Buenos Aires, se distinguen tres regiones (Overbeck, 1989)⁶:

- Epilimnio: es el estrato superior y más cálido, bien iluminado, donde prevalece la fotosíntesis debido a las algas fitoplanctónicas. Esta actividad también depende de la transparencia del agua.
- Hipolimnio: es la zona más profunda y es la más fría. Esta zona se ve menos afectada por los vientos.
- Metalimnio o Termoclina: se encuentra entre estas dos últimas. La temperatura disminuye rápidamente a medida que aumenta la profundidad.

En los lagos estratificados templados la producción primaria es metabolizada en el metalimnio en un 85% aproximadamente. Por lo tanto el seguimiento de la temperatura del lago aporta información del estado eutrófico y sus consecuencias en el medio ambiente lacustre.

De los diversos estudios disponibles surge que cualquier calentamiento de lagos resulta en un incremento general de la biomasa y que los lagos presentan individualmente cambios peculiares en las especies planctónicas y a veces también la inmigración de especies exóticas. Si el lago pierde su hipolimnio frío, se observa un cambio importante de la fauna profunda. Sin embargo, hay muy poca información sobre el impacto del calentamiento en la zona litoral. El aumento de la biomasa y la disminución de la diversidad parecen ser con frecuencia las características más generales de la respuesta de la comunidad litoral al calentamiento (Loffler, 1989)⁸.

La Figura 1 presenta un esquema del perfil de temperatura con la profundidad en un lago templado.

⁸ Loffler, H., *Directrices para la Gestión de Lagos, Vol.3, Capítulo 7: Impacto del Hombre*, Jorgensen y Vollenweider Ed., International Lake Environmental Committee Foundation, Japón, 71-78, 1989.

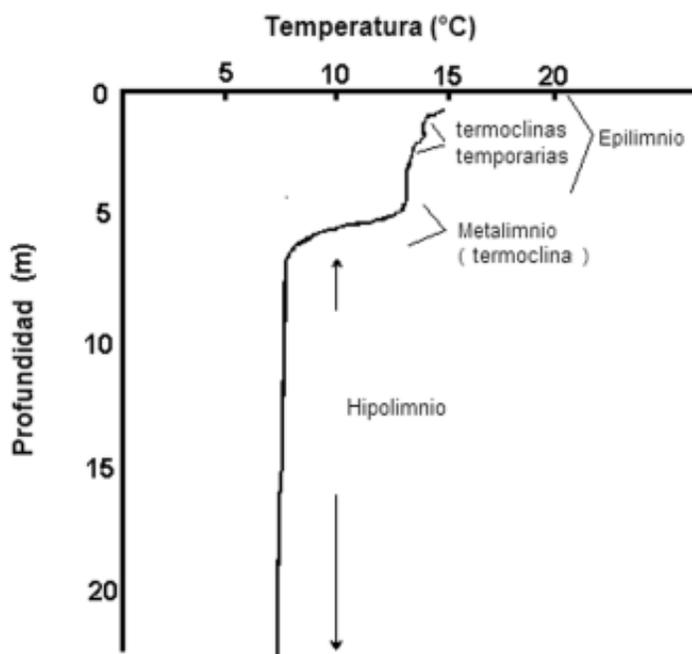


Figura 1: Esquema del modelo típico de temperatura en función de la profundidad, en lagos de zonas templadas.

Patrón de flujo de agua superficial en lagos

Los efectos del viento sobre un lago o reservorio son de diversos tipos: la generación de ondas de superficie, las mareas de viento, las seiches, la inclinación por viento de la superficie y las corrientes. Las corrientes en lagos y embalses, que en general son difíciles de observar a simple vista, transportan masa a grandes distancias y requieren en general de metodologías numéricas para su predicción debido a su fuerte dependencia de la forma de la costa, topografía del fondo y distribución del viento. A los fenómenos ya mencionados debe agregarse la estratificación estacional de los cuerpos de agua, por ejemplo, por gradientes de temperatura y/o densidad, que modifica sustancialmente la respuesta a la acción del viento. Uno de los mecanismos de mezcla en lagos templados, hasta las zonas más profundas, se debe a la acción del viento.

Los patrones de circulación que se forman están asociados, por lo tanto, a los campos de viento. La dinámica del campo de temperatura de superficie de los lagos templados, puede ser descrita mediante la ecuación (1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = V \cdot \nabla T + k \nabla^2 T - \lambda T + A + \xi \quad (1)$$

Donde T es la temperatura media de la capa superior de mezcla, V es el vector del campo de advección, k es el coeficiente de difusión isotrópico turbulento, λ es el decrecimiento temporal de relajación local, A es el flujo de calor en la interacción agua-atmósfera y en el intercambio con las capas más profundas, y ξ es el flujo de calor debido a las correlaciones pequeñas debidas a procesos al azar correspondientes a fluctuaciones en el espesor de la capa de mezcla, en el campo de velocidad y en las condiciones atmosféricas (Semovski y otros, 1997)⁹.

Las imágenes satelitales térmicas muestran patrones de temperatura y posibilitan la detección de anomalías. A partir de esto, se estiman los valores de la variación temporal ($\partial T/\partial t$), del gradiente (∇T) y del laplaciano ($\nabla^2 T$) de la temperatura mediante el uso de una secuencia de campos térmicos de superficie, estimados a partir de imágenes satelitales. En este trabajo se utilizan imágenes del sensor AVHRR de los satélites meteorológicos de la serie NOAA, obtenidas mediante la estación receptora del LISAMET¹⁰ (TimeStep, 1995)¹¹.

Zona analizada

El lago Buenos Aires se encuentra en 46° 30' latitud Sur, 72° 00' longitud Oeste. Tiene una superficie total de 2240 km², de los cuales 881 km² pertenecen a la Argentina. Su origen se encuentra en las aguas de deshielo del hielo continental. El lago tiene una forma alargada y sus dimensiones en el sector argentino son: 50 km de largo por 20 km de ancho, aproximadamente. Está limitado por bardas de escasa altura hacia el este y por la Cordillera de los Andes, con alturas que superan los 1700 m snm¹² hacia el oeste (ver Figura 2). La cota media del lago es de 200 m. El paisaje del lago es sorprendente: hacia la Argentina la ribera es plana, mientras que en la porción chilena está rodeado de grandes montañas rocosas, modeladas por la acción de los glaciares¹³. El lago pertenece a la vertiente Pacífica aportando al río Baker que es el más caudaloso de Chile.

Las riberas están muy erosionadas y predominan fuertes vientos que hacen peligrosa la navegación incluso a embarcaciones mayores, debido al fuerte viento y las corrientes.

⁹ Semovski, S. V., Sherstyankin, P. P., Shimaraev, M. N., Gnatovsky, R. Y. and Granin, N. G. **Lake Baikal thermal fronts and currents analysis studies using IR AVHRR imagery**, Proc. VII Int Conf. Lakes conservation and Management, Tomo 1, 6 pp., 1997.

¹⁰ Laboratorio de Imágenes satelitales y meteorología. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue.

¹¹ TimeStep, 10 bit HRPT - Timestep Weather Systems receiver manual, UK, 32 pp., 1995.

¹² Sobre el nivel del mar

¹³ El país de los argentinos, Buenos Aires, Centro Editor de América Latina, T. 4, pp. 103-104, 1975.

La Figura 2 presenta la topografía de la zona en que se encuentra ubicado el lago Buenos Aires a partir de las mediciones efectuadas por la misión SRTM¹⁴.

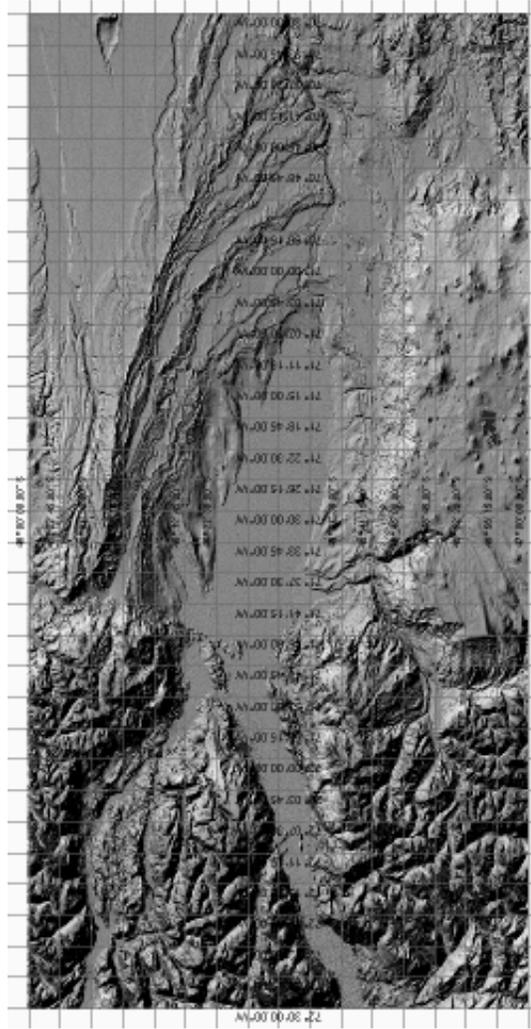


Figura 2: Topografía del lago Buenos Aires. Datos: Shuttle Radar Topography Mission¹⁵

¹⁴ SRTM Shuttle Radar Topography Mission is an international project spearheaded by the National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA). <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

¹⁵ Schwalb, A., **The TIROS-N A-G SATELLITE SERIES**, NOAA Technical Memorandum NESS 95, Washington D.C, USA, 1978.

Datos utilizados

Se utilizaron las imágenes satelitales NOAA-AVHRR^{3,4} detalladas en la Tabla I. Las imágenes fueron seleccionadas teniendo en cuenta un criterio basadas en condiciones de viento y cielo despejado verificados con las observaciones meteorológicas de superficie. La resolución espacial de las mismas de 1.09 km (0.00949 grados latlong) en el nadir y su resolución radiométrica es de 1024 niveles digitales (ND), lo que permite distinguir entre píxeles con una diferencia de temperatura de 0.1 K. Las bandas espectrales que se utilizan en este trabajo son el canal 4 (10.5 - 11.5 μm) y el canal 5 (11.5 - 12.5 μm) (Schwalb, 1978, 1982.)^{15,16}

Tabla 1: Datos orbitales de las imágenes satelitales utilizadas: fecha, hora UTC¹⁷, ángulos de elevación y azimutal (medidos en grados y respecto a la localidad de Los Antiguos (46.55 °S y 71.62 °W).

Fecha	Hora	Elevación	Acimut
09-02-01	19:06	73.39°	75.82°
	21:30	47.11°	79.37°

Las escenas fueron georreferenciadas y corregidas mediante el método de los puntos de control, mientras que la temperatura de la superficie de agua (T) se obtuvo a partir de la temperatura radiante de los canales 4 (de 10.5 a 11.5 μm) y 5 (de 11.5 a 12.5 μm) calibrados previamente mediante los coeficientes de calibración pre-lanzamiento (Schwalb, 1978 y 1982)^{18,19}.

Para este estudio se obtuvo información del sensor AVHRR de los satélites NOAA16 y NOAA14 en alta resolución, para dos pasajes consecutivos sobre el área, a las 19:00 y 21:30 UTC. Los datos del canal 2 (7.25–11.0 μm) fueron utilizados para la detección de nubes. A partir de las imágenes seleccionadas se aplicaron las correcciones atmosféricas a la temperatura de brillo para obtener el valor de temperatura de superficie (Ts).

Para los canales 4 y 5 se utilizó un procedimiento de calibración desarrollado por la NASA. La corrección atmosférica se realizó teniendo en cuenta el espesor óptico

¹⁶ Schwalb, A.; **Modified version of the TIROS-N/NOAA A-G Satellite Series (NOAA E-J) - Advanced Tiros N (ATN)**; NOAA Technical Memorandum NESS 116; Washington D.C.; 23pp. 1982.

¹⁷ Tiempo universal coordinado

¹⁸ Schwalb, A., **The TIROS-N A-G SATELLITE SERIES**, NOAA Tech. Memo NESS 95, Washington D.C, USA, 1978.

¹⁹ Schwalb, A.; **Modified version of the TIROS-N/NOAA A-G Satellite Series (NOAA E-J) - Advanced Tiros N (ATN)**; NOAA Technical Memorandum NESS 116; Washington D.C.; 23pp. 1982.

de la atmósfera determinado a partir del ángulo cenital del satélite. El área correspondiente al lago en cada imagen fue seccionada utilizando una máscara estándar.

El algoritmo aplicado para convertir las radianzas observadas en temperaturas de superficie se basó principalmente en el algoritmo para temperaturas de superficie del mar presentado por McClain y otros (1984)²⁰ y modificado según Schwab y otros (1999, 2002)²¹. La validación para lagos fue realizada por Li y otros (2001)²². El conjunto de coeficientes fue obtenido en la internet.²³

Las radianzas corregidas de Rayleigh y el espesor óptico fueron utilizados para remover los efectos de la atmósfera y la geometría de visión e iluminación. La información de los canales 4 y 5 fue transformada a unidades de temperatura de brillo utilizando la función para cuerpo negro de Planck.

El algoritmo utilizado es esencialmente el algoritmo no lineal para la temperatura de superficie del mar (NLSST: [Mc Clain, y otros (1984)¹², Walton y otros (1998)²⁴]. La forma del algoritmo es:

$$\begin{aligned} \text{NLSST} &= A1 (T4) + A2(T4-T5)(\text{MCSST}) + A3(T4-T5)(\text{Secq}-1) - A4 \\ \text{MCSST} &= B1 (T4) + B2(T4-T5) + B3(T4-T5)(\text{Secq}-1) - B4 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde T4 y T5 (°K) son las temperaturas de los canales 4 y 5 respectivamente; Secq es la secante del ángulo cenital q, NLSST y MCSST son SST no lineal y lineal multicanal en Centígrados y A1-A4 y B1-B4 son coeficientes constantes.

Para disminuir los errores se seleccionaron pasadas de satélite con ángulo cenital SATELITAL menor a 53°, ya que mayores espesores atmosféricos lleva a una mayor atenuación en los valores de la radianza emitida en superficie.

La temperatura de superficie del agua fue calculada para cada píxel con la metodología descrita anteriormente, considerando las dos sub escenas consecutivas.

Incorporando los datos de temperatura superficial se aproximaron los términos de variación local, gradiente y laplaciano de la temperatura de superficie de la ecuación de energía (1) utilizando un modelo de diferencias finitas (Mish, 1998)²⁵ a partir de un

²⁰ Mc Clain, E.P., Pichel, W.G., and Walton, C.C. (1984) Comparative Performance of AVHRR based multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research* 90:(11587-11601)

²¹ Schwab, D.J.; Leshkevich, G.A.; and Muhr, G.C. (1999) Automated mapping of surface water temperature in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes research* 25(3):468-481.

²² Li, X., Pichel, W., Clemente-Colón, P., Krasnopolsky, V. And Sapper, J. (2001) Validation of coastal sea and lake surface temperature measurements derived from NOAA-AVHRR data. *International Journal of remote Sensing*. 22(7):1285-1303.

²³ <http://manati.wwb.noaa.gov/sst/coefficient.html> and <http://www.sat.dundee.ac.uk/cal/noaa.sst>.

²⁴ Walton, C.C., Pichel, W.G., Sapper, J.F. and May D.A, (1998) The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *Journal of geophysical research*. 103(C12):27999-28012.

²⁵ Mish, K. D., (1998) Finite difference method, in *The handbook of Fluid Dynamics*, RW Johnson Ed. CRC Press, 26:1-11.

código FORTRAN desarrollado en la Universidad del Comahue. La velocidad advectiva se obtuvo despejándola de la ecuación anterior.

Resultados

Características ambientales en la zona

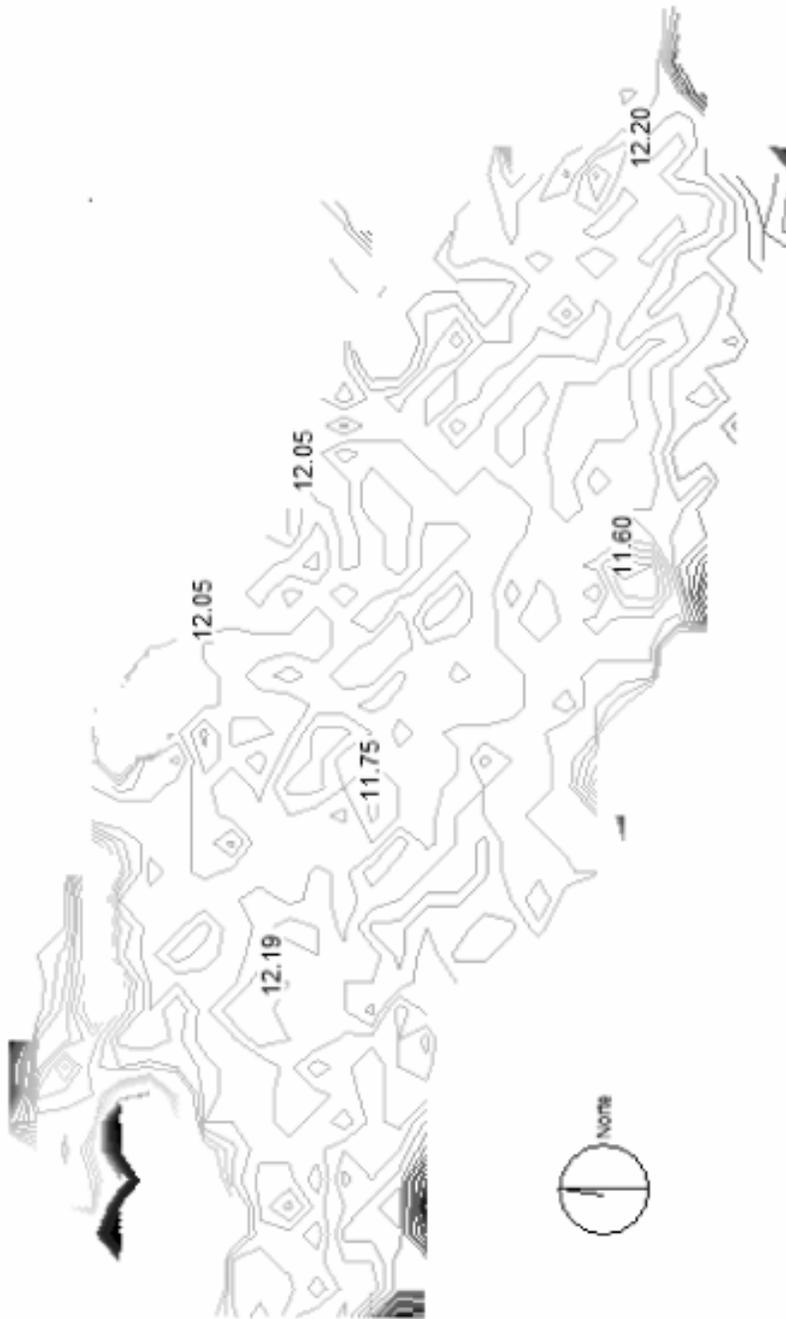
La velocidad media del viento medida en la estación meteorológica Perito Moreno Aero es 11.7 m/s para el mes de Febrero y la dirección más frecuente es el W.

La velocidad media del viento en la zona de estudio durante la tarde del 9 de Febrero de 2001 se caracterizó por vientos oscilando entre 8.3 m/s del oeste a las 15:00 hora local a 5.6 m/s del oeste noroeste a las 18:00 hora local. La temperatura del aire cerca del suelo fue 10.5 °C y 4.6 °C respectivamente. La temperatura de la superficie del agua del lago Buenos Aires se mantiene superior a 4.0 °C y varía de acuerdo a la época del año, hora del día y profundidad. El ciclo diario de la temperatura superficial presenta por la noche el centro más caliente que las orillas, mientras que durante el día se invierte este comportamiento, siendo este patrón característico en los lagos templados (Lässig et al, 1999)²⁶.

Análisis del patrón de viento superficial

La dirección del viento predominante durante las horas en que se obtuvieron las dos imágenes satelitales fue del Oeste, es decir, alineada con el eje longitudinal del lago (Figura 1).

²⁶ Lässig, J. L., Flores, L.A., Bastanski, M.A. and Palese, C., (1999) **Monitoreo de espejos de agua en la región Comahue**, Congreso Argentino de Grandes Presas y Aprovechamientos hidroeléctricos. San Martín de los Andes, Argentina, 411-416.



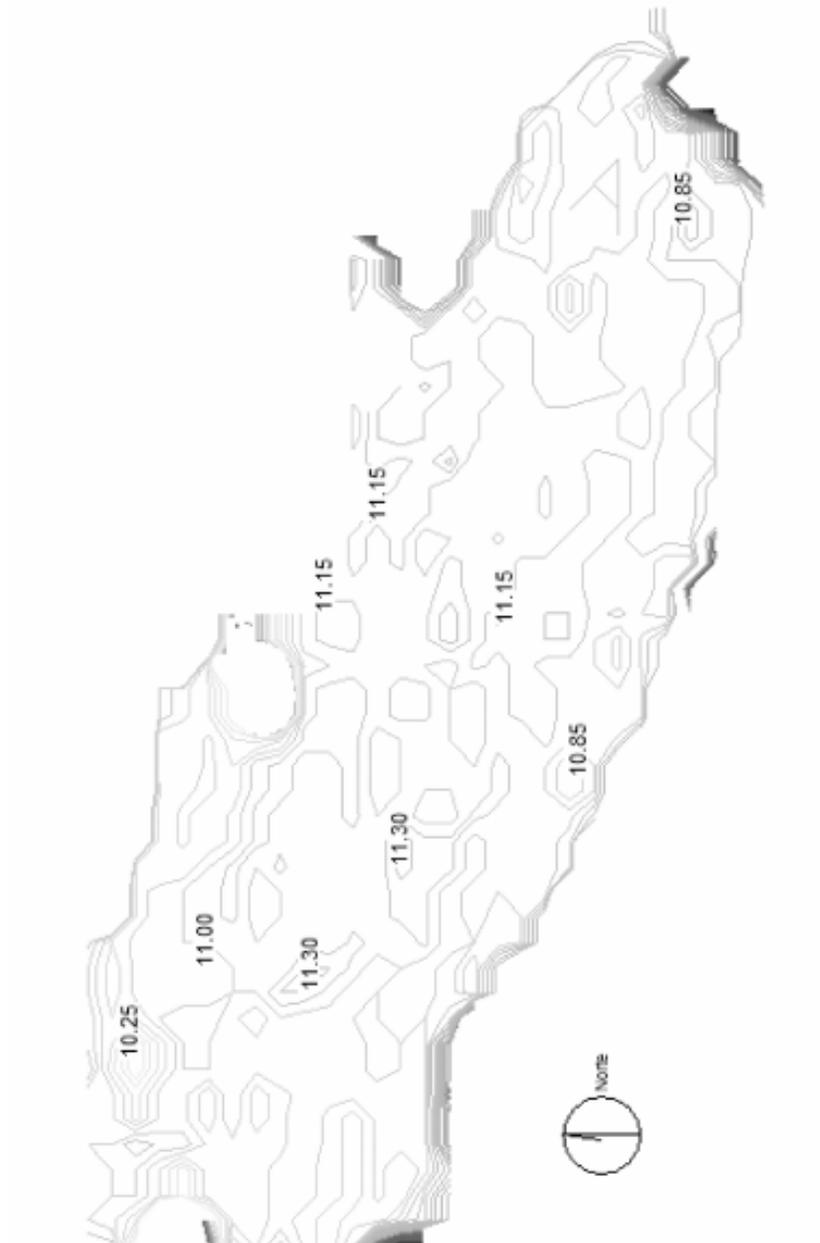


Figura 3: Campo térmico de la superficie del agua del lago Buenos Aires del 9 de Febrero de 2001: (**pag. 18**) 19:06 UTC; (**pag. 19**) 21:30 UTC.



Figura 4: Campo de velocidades advectivas del pelo de agua, calculadas considerando el forzante debido al viento, en el lago Buenos Aires el 9/02/01.

La Figura 3 presenta la temperatura de la superficie del agua del lago Buenos Aires del 9 de Febrero de 2001: **(a)** 19:06 UTC; **(b)** 21:30 UTC obtenida según lo descrito precedentemente a partir de datos del sensor NOAA AVHRR. Ambas imágenes muestran una zona más fría con temperatura cercana a **11.6 °C** en la primer pasada y un campo térmico mucho más homogéneo en la segunda pasada con temperaturas de alrededor de 11°C. En ambas imágenes se observa una acumulación de agua de mayor temperatura hacia el este del lago, siendo más evidente en la primera.

A partir del modelo se obtuvieron soluciones para el campo de velocidad advectiva (Figura 4). La zona más fría muestra una configuración del flujo que presenta una divergencia de agua y velocidades más débiles que se asociarían con surgencias de agua fría. Las líneas cercanas a la costa presentarían velocidades más débiles y el centro del lago mostraría mayor velocidad del agua. Características más generales podrían inferirse analizando un mayor número de situaciones. En las líneas costeras, el flujo queda representado por un factor dinámico asociado a las olas ya que estas corren semi paralelas a la línea de costa y un factor térmico ya que los límites pueden incluir suelo costero con temperatura mayor a la del agua dentro de los píxeles.

Conclusiones

El presente trabajo es una primera aproximación a la resolución del campo advectivo superficial en un espejo de agua sometido a la acción del viento, calculado a partir de datos de temperatura de superficie del agua obtenida por medio de imágenes satelitales NOAA-AVHRR. El trabajo presenta una etapa preliminar: en etapas posteriores se ajustarán parámetros empíricos de flujos turbulentos a la ecuación de la energía.

Los resultados preliminares indican un patrón de flujo que presentan características reales, con velocidades debidas a la acción forzante del viento en la situación analizada (con viento en superficie de 8.3 m/s).

A partir de los cálculos de la ecuación de la energía, y del campo de velocidades advectivas, se aprecia un predominio del flujo del agua en la dirección forzada por el viento, en especial en el centro del lago con velocidades inferiores a 1m/s. Se detecta en el campo de temperaturas superficiales una zona que se asociaría a una surgencia de agua más fría relacionada con un patrón de recirculación con velocidades débiles.

La diferencia de temperatura entre el agua surgente y el agua que la rodea es de aproximadamente 0.7 °C, esto indicaría que estas aguas son removidas desde niveles cercanos a la termoclina. En vista de los resultados presentados, el viento es un factor importante en la dinámica de este lago y su pronóstico proporcionaría información sobre las variaciones en el ambiente para la vida lacustre.

Las imágenes satelitales constituyen una herramienta con un importante potencial para el estudio de los lagos templados.