

# **ESTUDIO DEL RECURSO ENERGÉTICO MARINO SOBRE EL ESTUARIO DEL RÍO GALLEGOS.**

*Buono Nicolás*<sup>(1)</sup>, *Zabaleta Federico*<sup>(1)</sup>, *Cáceres Raúl*<sup>(1)</sup>, *Tomazin Nicolás*<sup>(2)</sup>, *Cecotti Roberto*<sup>(1)</sup>.

(1) *Laboratorio de Hidromecánica - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata*

(2) *Instituto Nacional del Agua*

E-mail: nicolasbuono8@hotmail.com/ fede.zabaleta@gmail.com

## **RESUMEN**

El estuario del Río Gallegos se presenta como un sitio con enorme potencial para el aprovechamiento de las corrientes oceánicas. La gran amplitud de marea presente en la región, en conjunto con la geomorfología característica del estuario, generan zonas con excelentes condiciones para la explotación del recurso a partir de sistemas hidrocinéticos.

Los estudios desarrollados en el presente trabajo se basaron en un análisis hidrodinámico y morfológico completo a partir de una modelación matemática avanzada, de manera tal de predecir a mediano plazo y gran escala, los campos de corrientes y la dinámica costera que afecta la región. Tales modelos numéricos fueron validados a través de mediciones de campo sobre las diversas variables involucradas. A su vez, se realizó un análisis detallado de los campos de vientos, las condiciones de oleaje y su influencia sobre la zona de interés, utilizando un modelo espectral para la generación y transformación de olas.

Si bien el estudio de las corrientes resulta de carácter fundamental para caracterizar la magnitud del recurso, un análisis sin la presencia de estructuras resulta insuficiente para determinar el verdadero potencial aprovechable. La extracción de energía puede generar modificaciones significativas sobre la hidrodinámica del estuario, afectando a su vez los patrones de erosión y sedimentación que se manifiestan sobre el mismo.

En consecuencia, se realizaron simulaciones numéricas representando las turbinas a través de expresiones que modifican la ecuación de cantidad de movimiento, con el fin de evaluar el impacto de los turbogrupos sobre las corrientes y la dinámica sedimentológica que se desarrolla en la zona de estudio. Dado que la metodología propuesta posee un sustento teórico y no ha sido validada con mediciones en situaciones reales, se desarrollaron distintos escenarios de modelación, a fin de evaluar la sensibilidad del impacto sobre el sector de interés.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen principalmente dos formas de producir energía a partir de las mareas. La primera de ellas se materializa a través del embalse de un recinto natural, tal como un estuario o bahía. Dicha modalidad, conocida como aprovechamientos mareomotrices, funciona análogamente a una central hidroeléctrica convencional, explotando la energía potencial a partir de la amplitud de marea disponible. La tecnología asociada a este tipo de producción recurre a turbogrupos lentos y de bajo salto, tales como las turbinas Bulbo y los equipos tubulares. Si bien esta clase de proyectos muestran un potencial energético de gran magnitud, existen implicaciones ambientales significativas que dificultan su implementación.

Otra alternativa de producción consiste en aprovechar la energía cinética de las corrientes. Las variaciones de nivel producidas a partir del movimiento de las mareas generan ingresos y egresos de grandes masas de agua dentro del recinto natural, promoviendo corrientes de flujo y reflujo de gran magnitud. Esta modalidad, conocida como aprovechamientos hidrocineéticos, presenta una tecnología de reciente desarrollo, basada principalmente en los diseños existentes de turbinas eólicas.

Con un litoral marítimo de 3.500 km de extensión, la Costa Patagónica representa un excelente campo para el aprovechamiento de la energía oceánica. La presencia de estrechos, bahías y estuarios naturales, combinada con la gran amplitud de marea característica de la zona, generan altas velocidades de corrientes de flujo y reflujo de mareas, aptas para la instalación de turbinas



**Fig 1.-** Ubicación de la zona de estudio y puntos característicos.

hidrocineéticas capaces de aprovechar la enorme cantidad de energía que este movimiento trae aparejado. A su vez, dado que el agua es unas 830 veces más densa que el aire, el recurso presenta un potencial muy atractivo en comparación con otras fuentes renovables de energía, tal como la eólica.

El objetivo principal del presente trabajo consiste en alcanzar una descripción del potencial de generación de energía hidrocineética a partir de las corrientes generadas por las mareas sobre el estuario del Río Gallegos, de manera tal que permita la elección de los mejores sitios para la instalación de equipos con las tecnologías que mejor se adapten a las condiciones locales y que están siendo objeto de investigación.

Cabe resaltar que la extracción de energía puede generar modificaciones tanto en las velocidades de las corrientes, como los patrones de erosión y sedimentación, causando algunos cambios en las zonas donde están ubicadas las turbinas (Couch y Bryden, 2004). Esto indica que un análisis del recurso sin la presencia de estructuras, resulta insuficiente para determinar el verdadero potencial extraíble en la zona en estudio. De esta manera, el presente trabajo de investigación propone como objeto evaluar el impacto de los turbogrupos sobre los campos de velocidades en entornos lejanos al sector de su implantación.

## ESTUDIO DE LA DINÁMICA COSTERA

El análisis de la energía disponible de un flujo de agua se muestra a continuación, partiendo con la forma básica de la energía cinética, según la ecuación:

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (1)$$

Donde m es la masa y v es la velocidad de la corriente. De esta manera, la densidad de potencia para un flujo puede expresarse a través de la expresión:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 \quad (2)$$

Donde A es el área de flujo interceptada por la turbina,  $\rho$  es la densidad del agua y P es la potencia del flujo. La selección del sitio a explotar resulta de carácter es fundamental para este tipo de aprovechamientos, dado que la energía cinética de una corriente está relacionada con su velocidad elevada al cubo. Esto significa que un flujo de la marea en movimiento, que se desplaza el doble de rápido que otra corriente de marea de igual volumen, generará ocho veces más energía. Debido a que las zonas a evaluar para la instalación de equipos generadores representan extensiones muy importantes, estudios basados en modelación matemática se presentan como la única alternativa posible de aplicación en plazos razonables de ejecución.

Todo lo anterior indica la necesidad de implementar un modelo hidrodinámico que permita evaluar diversos escenarios y condiciones de clima marítimo para diferentes puntos de la zona costera, que incluya además estrategias para determinar las zonas más aptas para la instalación de los turbogrupos. Asimismo, la representatividad de estos resultados puede ser mejorada considerablemente a partir de mediciones de campo en puntos determinados.

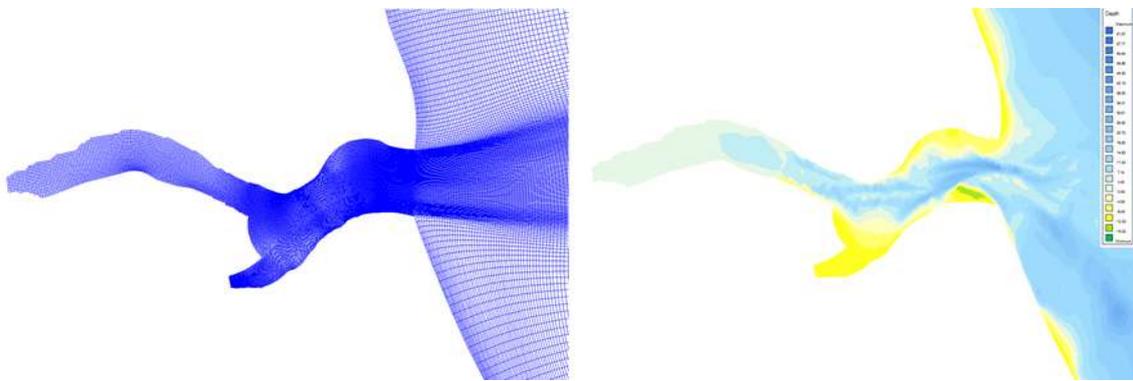
### *Modelos numéricos implementados*

El presente trabajo recurre a la simulación numérica como herramienta fundamental para la caracterización hidrodinámica y sedimentológica de la zona de interés. De esta manera, resulta posible analizar los diversos patrones de corrientes, distribuciones del oleaje y dinámica del transporte de sedimentos para diferentes condiciones climáticas y de marea.

Los modelos numéricos utilizados son Delft3D y SWAN, ambos desarrollados por Delft University of Technology de Holanda. Delft3D consiste en un sistema de modelación acoplado compuesto por varios módulos que incluyen la modelación hidrodinámica, transporte de sólidos, calidad de agua y transporte de sustancias en general (Delft University of Technology, 2004). Para este estudio se implementó el módulo Delft3D-Flow (hidrodinámico) que incluye el módulo D-Morphology para transporte de sedimentos y análisis morfológico (van Rijn, 1993). Por su parte, SWAN es un modelo numérico de tercera generación que permite estimar los parámetros de olas en regiones costeras a partir de la definición del viento, la batimetría y campos hidrodinámicos, basándose en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas (Booij et al., 1999).

La implementación de ambos modelos requiere previamente de la construcción de una o más grillas de cálculo diseñadas eficientemente a través de un balance entre el costo computacional y la precisión de los resultados. De esta manera, a través de un largo proceso de ajuste y evaluación se definió el dominio y densidad del mallado, el cual se extiende prácticamente en todo el interior del estuario y hasta unos 30 km hacia aguas abiertas, contabilizando alrededor de 96000 elementos de aproximadamente 500 m en la zona exterior y 25 m como mínimo en la zona interior (Ver Figura 1).

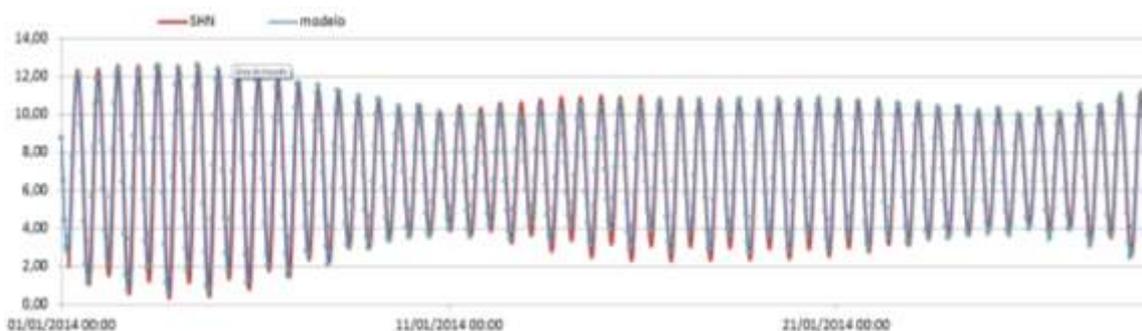
Por su parte, para la elaboración del modelo digital de elevación se utilizó información de las cartas náuticas H-451b, H-451a, H-416 y H-413 del Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Asimismo dicho set de datos fue complementado con datos provenientes de la base global GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). De forma adicional, se utilizó información correspondiente a Topografía de Radar del modelo digital de elevaciones denominado SRTM (Misión Topográfica Shuttle Radar) (Bamler, 1999).



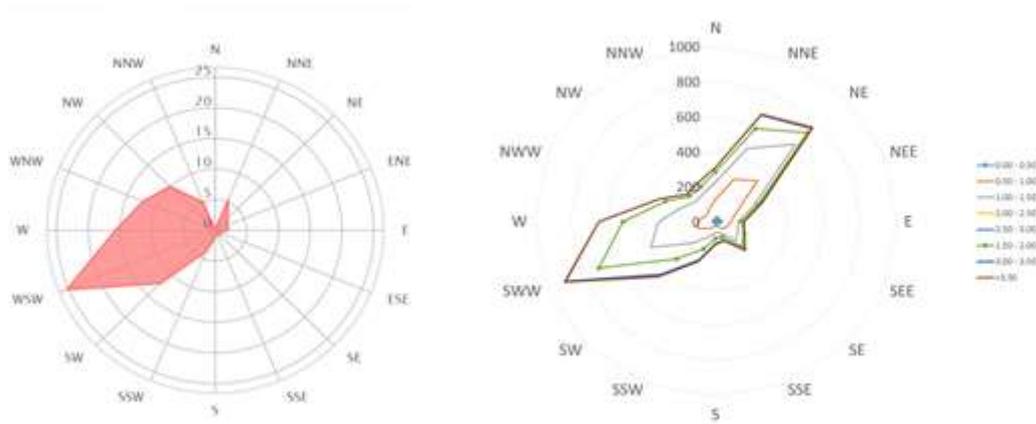
**Figura 2.-** Malla curvilínea de cálculo y modelo digital de elevación implementado para la modelación.

### *Análisis de vientos, olas y mareas*

El proceso de modelación numérica requiere la definición de forzantes astronómicos y meteorológicos como dato de entrada. De esta manera, se realizó un análisis estadístico de los campos de vientos, patrones de oleaje y niveles de marea que afectan a la zona de estudio. Las fuentes de información implementadas incluyen la base de datos públicos NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) y el Servicio Meteorológico Nacional (Vientos), el proyecto IOWAGA (Olas) (Ardhuin et al., 1991-2011), el modelo global DTU10 (Munk y Cartwright, 1966; Lyard et al., 2006; Andersen y Knudsen, 2009) y el Servicio de Hidrografía Naval (Mareas). Todos estos factores fueron incluidos en la modelación numérica con el fin de analizar su influencia sobre los patrones e intensidades de corrientes dentro del estuario (Ver Figuras 2 y 3).



**Figura 3.-** Extracto de la serie de niveles de marea modelada con DTU10 y datos de la tabla de marea del SHN para punta Loyola.



**Figura 4.-** Rosa de vientos anuales (izquierda) y rosa de olas en 68°W 51,5°S (derecha). Fuente: Elaboración propia a partir de datos NCEP/NCAR e IOWAGA.

### *Análisis de sensibilidad*

La influencia del viento y el oleaje fue analizada a través de distintos escenarios de modelación. Los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas respecto a la magnitud y dirección de los flujos y reflujos (Ver Figura 4). En consecuencia, se concluye que la incidencia de tales parámetros sobre las corrientes de marea presentes dentro del estuario no es significativa.



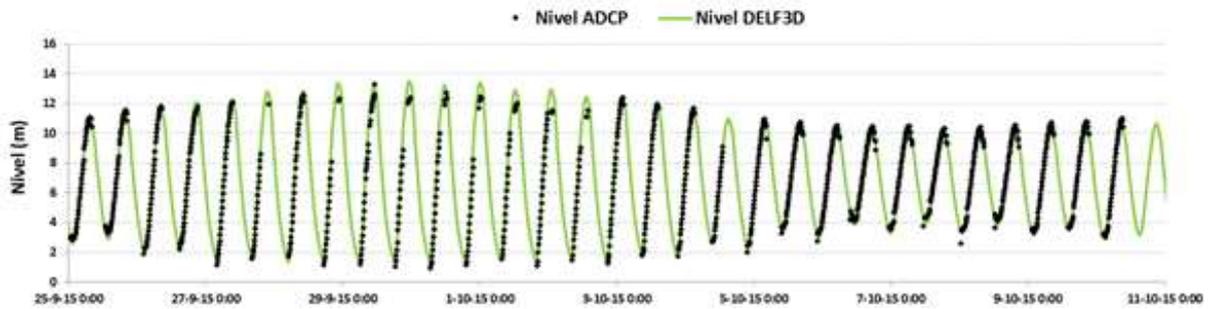
**Figura 5.-** Comparación de velocidades de corriente para distintos escenarios de viento.

### *Calibración del modelo*

En el marco del presente estudio resulta de carácter fundamental efectuar mediciones de campo que involucren todas las variables de interés. La información obtenida, una vez tratada estadísticamente, permite generar una base de datos esencial para la calibración del modelo matemático y de esta manera, validar las predicciones y resultados que brinda la simulación numérica. El equipo implementado, conocido genéricamente como ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) permite obtener registros de niveles, velocidad y dirección de la corriente en tiempo real para distintas capas a lo largo del tirante de agua (NORTEK AS, 2001) (Ver Figura 1).

El instrumento instalado registró valores de presión y velocidad en intervalos temporales de 10 minutos durante el período que se extiende entre los días 24/09/2015 y 15/10/2015. A continuación se presenta la comparación de los datos medidos con los resultados obtenidos a partir de la modelación matemática para el

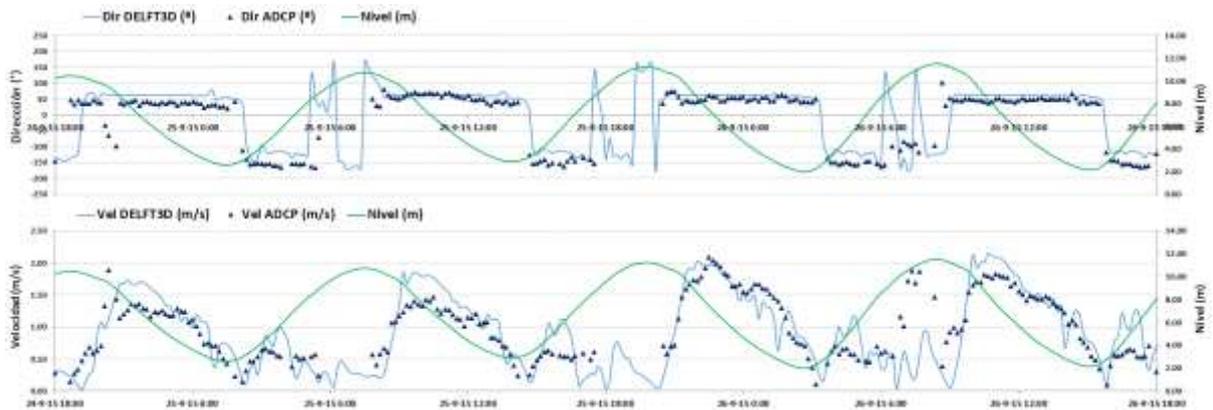
periodo señalado. Estos últimos fueron calibrados previamente a partir de las tablas de marea del Servicio de Hidrografía Naval.



**Figura 6.-** Comparación de niveles medidos y resultados del modelo. Fuente: Procesamiento de datos ADCP y resultados modelo Delft3D.

Se observa en la Figura 5 la correlación existente entre los datos medidos respecto a los resultados del modelo. Cabe destacar que los registros del ADCP fueron filtrados de manera tal de eliminar aquellas mediciones consideradas no satisfactorias, las cuales se manifestaron sistemáticamente durante el periodo de bajantes. Si bien es recomendable contar con un periodo de medición más extenso y la calidad de datos mejorada, se concluye que los resultados del modelo permiten predecir razonablemente la variación de amplitud de marea y los niveles resultantes dentro del estuario.

Se presenta a continuación la comparación de los datos medidos con los resultados obtenidos a partir de la modelación matemática, tanto en términos de velocidades como direcciones.



**Figura 7.-** Correlación de velocidades entre datos medidos y modelados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ADCP y modelación en Delft3D.

Se observa en la Figura 6 la correlación existente entre las mediciones procesadas y los resultados de la modelación matemática durante un periodo de 48 horas respectivamente. Se señala la concordancia en términos de evolución temporal y magnitud de la velocidad y dirección de la corriente. A su vez, se observa una disminución en la densidad de datos durante los periodos de bajamares y transiciones entre flujo y refluo debido al filtrado de datos. Se puede concluir que los valores de dirección y velocidad de corriente presentan una concordancia razonable tanto en forma como magnitud, exceptuando aquellos periodos donde la dispersión direccional entre capas es notoria y los datos medidos fueron filtrados.

Si bien los datos disponibles representan un periodo escaso de medición y la calidad de los registros debe ser

mejorada, se considera que la correlación existente entre las mediciones y los resultados de la simulación numérica son suficientes para validar el modelo matemático propuesto en esta etapa de estudio. No obstante, resulta de carácter fundamental destacar la necesidad de extender las campañas de medición en fases posteriores, de modo tal de brindar una mejora sobre el proceso de calibración del modelo matemático.

### *Influencia de las turbinas en el campo de velocidades*

En las turbinas eólicas, la influencia de la extracción de energía cinética es tenida en cuenta estableciendo una distancia mínima para la separación entre turbinas, suponiendo de esta manera que la energía se recupera a cierta distancia detrás de la misma. Las turbinas eólicas funcionan dentro de las capas más bajas de la atmósfera, por lo que la cantidad de movimiento extraída por la turbina es recuperada por los aportes de las capas superiores, en distancias del orden del 10 veces el diámetro del rotor.

A diferencia de las turbinas eólicas, las turbinas hidrocínicas abarcan una proporción importante de la altura de agua disponible, y es por esto que la energía cinética extraída no es recuperada rápidamente aguas abajo de la turbina. La extracción de energía puede generar modificaciones tanto en las velocidades de las corrientes, como los patrones de erosión y sedimentación, causando grandes cambios en las zonas donde están ubicadas las turbinas. Esto indica que un análisis hidrodinámico sin la presencia de estructuras, resulta insuficiente para determinar la potencialidad de la zona en estudio.

Para la modelación numérica de un sistema de este tipo, generalmente el rotor de la turbina es considerado como un disco que ejerce una fuerza retardadora del fluido, conocida como fuerza de arrastre. Esta fuerza depende del área del disco, de la velocidad de escurrimiento a través del mismo, y del coeficiente de arrastre (que representa la cantidad de potencia que es transferida del fluido al rotor). Este coeficiente varía con la velocidad del fluido. Además, siempre que sea posible, es necesario considerar la fuerza ejercida por la estructura que sostiene al rotor.

En modelos bidimensionales, las turbinas hidrocínicas pueden ser representadas introduciendo un término adicional en las ecuaciones de cantidad de movimiento, los cuales tienen en cuenta la extracción de cantidad de movimiento generada por la fuerza de arrastre inducida por la turbina. El modelo Delft3D ofrece la posibilidad de introducir elementos que generan una variación en la cantidad de movimiento, conocidos como "porous plate". Antecedentes recientes muestran que los efectos de las turbinas hidrocínicas se podrían simular mediante esta herramienta en la malla computacional (Bastor et al., 2014; Sagar Mungar, 2014). Mediante el análisis de las ecuaciones que describen el porous plate y las turbinas hidrocínicas, es posible establecer una similitud entre los términos que se introducen en la ecuación de cantidad de movimiento para estas dos estructuras.

En Delft3D el término introducido en la ecuación de cantidad de movimiento es el siguiente:

$$M_{\xi} = -c_{loss} \frac{U_{m,n}|U_{m,n}|}{\Delta x} \quad (3)$$

El único coeficiente a definir es el  $c_{loss}$ , que puede ser calculado a partir de una similitud con las turbinas hidrocínicas. La fuerza de arrastre para N turbinas será:

$$F = N \cdot \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_t \cdot u^2 \quad (4)$$

N: Número de turbinas

Cd: Coeficiente de arrastre

$\rho$ : densidad del agua

At: Área de la turbina

u: velocidad de la corriente

La pérdida de cantidad de movimiento por unidad de volumen puede ser calculada dividiendo esta fuerza por la masa de una celda:

$$M_\xi = \frac{N \cdot \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_t \cdot u^2}{\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot H} \quad (5)$$

Igualando esta ecuación con la del porous plate:

$$\frac{N \cdot \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_t \cdot u^2}{\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot H} = -c_{loss} \frac{u^2}{\Delta x} \quad (6)$$

$$c_{loss} = \frac{-N \cdot C_d \cdot A_t}{2 \cdot \Delta y \cdot H} \quad (7)$$

De esta manera, se podría estimar el coeficiente  $c_{loss}$  a partir de tres parámetros de las turbinas (el número de turbinas, el área ocupada por cada turbina, y el coeficiente de arrastre). No obstante, los parámetros mencionados dependen del tipo de proyecto elegido, la configuración de los turbogrupos, así como la necesidad de realizar ensayos específicos para determinar el coeficiente de arrastre.

Por otra parte, cabe mencionar que para poder representar una sola turbina, es necesario que la misma tenga el tamaño de la celda donde será representada, por lo que las mismas deberían ser bastante pequeñas. Asimismo, la escala de los procesos mostrados en estos modelos es del orden de kilómetros, por lo que este tipo de modelación permitirá evaluar la influencia de la turbina en los campos de velocidades en entornos lejanos a la máquina, pero no en los campos inmediatos a ella.

Debido a que el modelo Delft3D no permite introducir coeficientes de arrastre variables, debe elegirse un único valor representativo para todas las situaciones. Se asume también que la turbina está siempre dirigida en la dirección del flujo, lo cual para algunos diseños de turbinas puede no ser cierto. A su vez, vale señalar que las estructuras de soporte de las turbinas no son modeladas mediante este proceso, por lo que se debería introducir algún parámetro adicional que incluya las pérdidas causadas por estas estructuras.

Esta metodología para la determinación del coeficiente  $c_{loss}$  posee un sustento teórico, pero no ha sido validado con mediciones en situaciones reales. Por lo tanto, se han realizado simulaciones con diferentes valores del coeficiente de pérdidas, a fin de analizar los efectos en los campos de corrientes. Dado que el

análisis sólo representa un ejercicio sobre el potencial impacto que generarían turbogrupos, se eligió un lugar arbitrario en el interior del estuario.

### *Potencial extraíble del estuario*

Dadas ciertas limitaciones de carácter ambiental, el flujo de energía asociado a las corrientes de marea no puede ser aprovechado en su totalidad. Por su parte, existen diversos factores geomorfológicos, sedimentológicos e hidrodinámicos, los cuales generan algunas restricciones sobre el aprovechamiento total del recurso disponible.

Los antecedentes disponibles indican límites de extracción en el rango de 10% - 20% sobre el flujo anual de energía (Bryden et al., 2006; Bryden y Couch, 2004). Esta restricción se fundamenta en evitar variaciones significativas sobre la hidrodinámica del estuario, lo cual afecta el transporte de sedimentos, nutrientes, oxígeno y consecuentemente la flora y fauna marina local. En el marco del presente estudio, se adopta un valor de referencia del 15% como límite de extracción, resaltando la necesidad de realizar estudios específicos en etapas posteriores de desarrollo.

A fin de estimar la energía extraíble en el estuario de Río Gallegos, se realizaron cálculos del flujo anual de energía a partir de la metodología recomendada por el EPRI (Electric Power Research Institute) (Hagerman y Polagye, 2006; Bedard et al., 2006). Dada la disponibilidad de un modelo numérico validado a través de mediciones, fue posible contar con un panorama completo acerca de la hidrodinámica del estuario y brindar mayores precisiones sobre el cálculo del flujo anual de energía. De esta manera, el procedimiento efectuado tuvo en cuenta la direccionalidad del flujo y la distribución no uniforme de densidades de potencia a lo largo de la embocadura.

## RESULTADOS

### *Respuesta del sistema con obras*

En el Anexo se presentan mapas con la representación de variaciones de velocidad para una situación con turbinas, respecto de las simulaciones sin turbinas. En los mapas se han representado diferentes condiciones de marea (flujo, reflujo, pleamar y bajamar), bajo la hipótesis de diferentes coeficientes de pérdidas en un amplio rango de posibilidades (desde  $c_{\text{loss}} = 0.4$  a  $c_{\text{loss}} = 10$ ). Si bien los valores mayores a  $c_{\text{loss}} = 1$  podrían parecer grandes en base a los antecedentes y estimaciones de pérdidas, debe estudiarse para cada proyecto en particular.

En los mapas indicados puede observarse que el coeficiente más bajo genera una reducción de las velocidades en condiciones de flujo y reflujo, de hasta 0.5 m/s con una extensión del orden de los 2km, tanto hacia aguas abajo como hacia aguas arriba de la línea que representarían un conjunto de turbinas hidrocinéticas (Ver mapa N°1 y N°2). Mientras que para un coeficiente igual a 1, las reducciones de velocidad pueden llegar hasta 1 m/s en algunos sectores (Ver mapa N°3 y N°4).

Cabe mencionar que los cambios de patrones de velocidades en estos casos no son significativos en el período de pleamar o bajamar, en los cuales las corrientes son muy bajas. Por lo tanto, los efectos de

reducción de las corrientes sólo se producen durante períodos determinados en marea creciente o bajante durante el ciclo.

Para un coeficiente de pérdidas mucho mayor, por ejemplo  $C_{\text{loss}} = 5$ , las reducciones pueden ser mucho más significativas, con valores de velocidades de 1.5 a 2 m/s menos. Por el contrario, se observa en la zona no intervenida y próxima a las “turbinas ficticias”, un incremento de las velocidades (Ver mapa N°5 y N°6).

Se realizó también un análisis morfológico del sistema bajo la hipótesis de la presencia de un grupo de turbinas. A partir del análisis de los resultados se concluye que las reducciones de velocidades que pueden generar la presencia de grupos de turbinas provocaría cambios en los patrones de sedimentación, llegando a cambiar de zonas de erosión a zonas de sedimentación (o viceversa), así como el cambio en las direcciones de las velocidades podría desplazar las zonas de erosión (o sedimentación). Cabe mencionar que dichos efectos sólo son importantes en el entorno de las estructuras consideradas (del orden de 3 km), lo cual representaría un impacto muy bajo para todo el estuario en general (Ver mapa N°7 y N°8).

### *Potencial hidrocínético del estuario y flujo anual de energía*

Una vez obtenidas las velocidades se realizaron determinaciones de densidad de potencia, como parámetro característico de la energía generada por las corrientes de mareas (Ver mapa N°10 y N°11). El análisis además se realizó en base al concepto de garantía, para saber qué porcentaje del tiempo se mantiene determinada potencia, o cuáles son los picos de densidad de potencia máxima y mínima (Ver mapa N°12).

La densidad de potencia no es el único parámetro del estuario que debe ser tenido en cuenta al momento de elegir un sitio para el aprovechamiento. La profundidad útil es otro factor de suma importancia que debe ser considerado al elegir una zona a explotar. En este sentido, existe conceptualmente un tirante máximo aprovechable para cada punto del estuario, el cual depende de un calado superior (por requerimientos para la navegación y para considerar alteraciones en las velocidades por viento u oleaje), de las mareas más bajas, y una capa cercana al lecho que no puede ser aprovechada (Hagerman y Polagye, 2006). A partir del modelo digital de terreno del estuario y los datos de marea, se pudo verificar que en la mayor parte del estuario se presentan profundidades aprovechables menores a 2 m, con zonas relativamente estrechas en el interior con profundidades del orden de los 15 m, y recién en la boca norte se presentan profundidades mayores a 25 m. Esto significa que a pesar de que las densidades de potencia sean altas, la capacidad de explotación puede ser relativamente baja para los equipos de generación desarrollados y probados hasta el momento. El mapa de profundidad aprovechable se encuentra disponible en el Anexo (Ver mapa N°9).

Por su parte, la potencia media anual generada por los flujos de marea se estimó en 67 MW, mientras que los reflujos de marea presentan un valor de 61 MW, dando como resultado una asimetría energética del 9%. En función de los resultados obtenidos y considerando el porcentaje de tiempo en el cual se produce el ciclo de marea, se obtiene un flujo anual de energía del orden de 470 GWh. Si se aplica factor de 15 % de extracción por limitaciones ambientales, se estima un potencial hidrocínético anual extraíble de 70 GWh como valor nominal de referencia.

## CONCLUSIONES

Se establece como conclusión que el potencial hidroenergético originado por las corrientes de marea presentes en el Estuario del Río Gallegos es de magnitud relevante. Por su parte, vale destacar que los aprovechamientos hidrocínicos se presentan como una fuente renovable y limpia de energía, con un alto grado de previsibilidad y sin necesidad de obras de cierre, disminuyendo considerablemente el impacto ambiental en comparación con los proyectos de embalse (Bahaj y Myers, 2003).

La extracción de dicho recurso hidroenergético será función de la ubicación del sector de explotación, la cantidad de equipos instalados, su velocidad de diseño, y la estrategia energética que se desee implementar con un aprovechamiento de este tipo. Asimismo, cabe recordar que las garantías de velocidad varían considerablemente entre distintas zonas del estuario, por lo cual la hidrodinámica será un factor fundamental en una eventual selección de un sitio de implantación de los turbogrupos. Asimismo, deberán tenerse en cuenta otras variables tales como la profundidad disponible, factores sedimentológicos, interferencias con vías navegables, incidencia del oleaje y proximidad a tierra (Bedard *et al.*, 2006).

Por otra parte, se observa que la extracción de energía genera modificaciones tanto en las velocidades de las corrientes, como en los patrones de erosión y sedimentación, causando algunos cambios en el sector donde se encuentran instaladas las turbinas. Sin embargo, dichos efectos sólo son importantes en el entorno de las estructuras consideradas (del orden de 2 a 3 km), lo cual representaría un impacto muy bajo para todo el estuario en general. Dado que la metodología propuesta posee un sustento teórico y no ha sido validada con mediciones en situaciones reales, resulta necesario desarrollar futuros estudios para cada proyecto en particular.

Si bien la extracción del recurso se encuentra limitada por diversos factores, los recientes avances en la tecnología aplicada a la obtención de energía de las corrientes y la disponibilidad de zonas adecuadas para su implantación justifican ampliamente el estudio y posterior desarrollo de esta clase de proyectos. Asimismo, se destaca la necesidad de promover futuras líneas de investigación, destinadas a lograr mayores conocimientos sobre el impacto ambiental que genera este tipo de aprovechamientos sobre los distintos ambientes marinos y costeros, como herramienta fundamental para optimizar la explotación de los sistemas hidrocínicos.

## REFERENCIAS

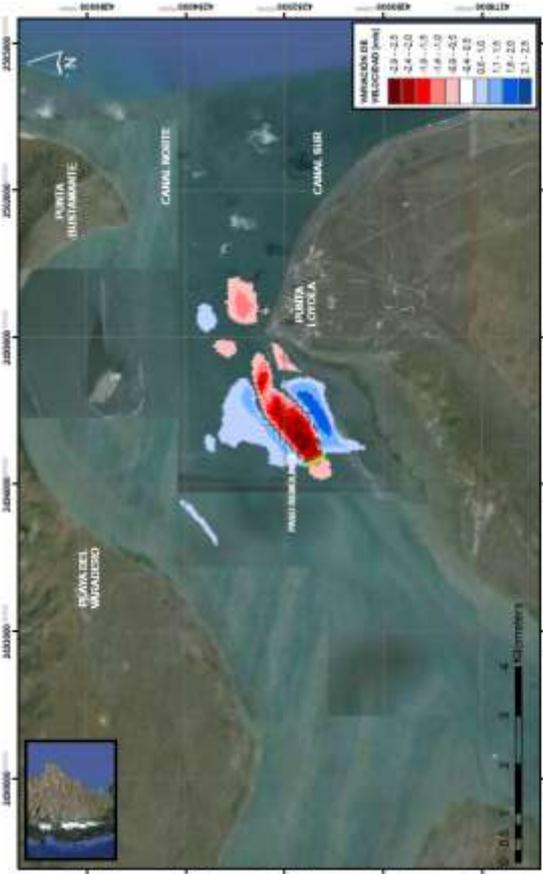
- Andersen O. B, Knudsen P., (2009) The DNSCO8 mean sea surface and mean dynamic topography. *J. Geophys. Res.*, 114, C11.
- Ardhuin, F., Hanan, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queeulou, P., Obrebski, M., 2011. Calibration of the “Iowaga” Global Wave Hindcast (1991-2011). Using ECMWF and CFSR Winds. *12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawai'i*. 13pp.
- Bahaj, A.S, Myers, L.E. (2003). Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production. *Renewable Energy, Volume 28, Issue 14*, pp. 2205-2211.
- Bamler, R., (1999). The SRTM Mission; A world wide 30 m resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days. *Photogrammetric Week. D. Fritsch & R. Spiller, Eds*.
- Bastor, S., Waldman, S., Side, J., (2014). Modelling energy extraction in tidal flows. *Terrawatt Consortium. Marine Alliance for Science and Technology for Scotland*
- Bedard, Roger; Previsic, Mirko; Polagye, Brian; Hagerman, George; Casavant, Andre. (2006). North America Tidal In-Stream Energy Conversion Technology Feasibility Study. *Electric Power Research Institute (EPRI). TP-008-NA*.
- Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H., (1999). A third generation wave model for coastal regions. Part 1: Model description and validation. *Journal of Geophysics Res*, 104(C4), pp 7649-7666.
- Bryden I.G., S.J. Couch, A. Owen, and G. Melville, (2006). Tidal current resource assessment, *IMEchE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy*.
- Couch, S. J. and Bryden, (2004). Numerical modelling of energy extraction from tidal flows. *Presented at the World Renewable Energy Congress, Innovation in Europe, Aberdeen*.
- Delft University of Technology, (2004). SWAN User manual (ver. 40.31), *Faculty of Coastal Engineering and Geosciences, Netherland*.
- Hagerman G. & Polagye B., (2006). Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices, *Electric Power Research Institute (EPRI). TP-001-NA*.
- Kalnay E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, and R. Reynolds (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O., (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics. Volume 56, Issue 5-6*, pp 394-415.
- Munk H. W., D. E. Cartwright, (1966). Tidal Spectroscopy and Prediction. *Philosophical Transactions, Royal Society of London*.
- NORTEK AS, (2001). Continental Current Profiler User Manual. *Document no.: N3009-105, Rev A, Norway*.
- Sagar Mungar, (2014). Hydrodynamics of horizontal-axis tidal current turbines – A modelling approach based on Delft3D. *Master of Science Thesis. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology*.
- van Rijn LC, (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. *University of Utrecht, The Netherlands*.

ANEXO

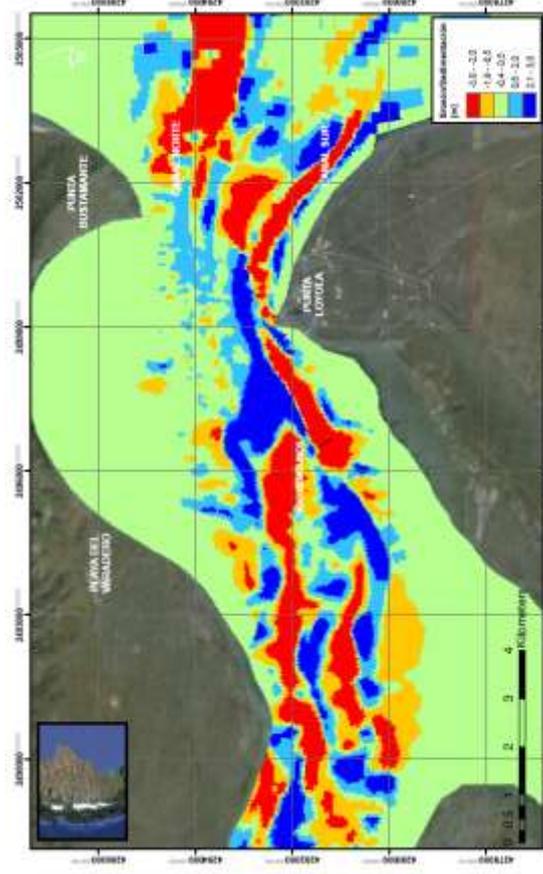




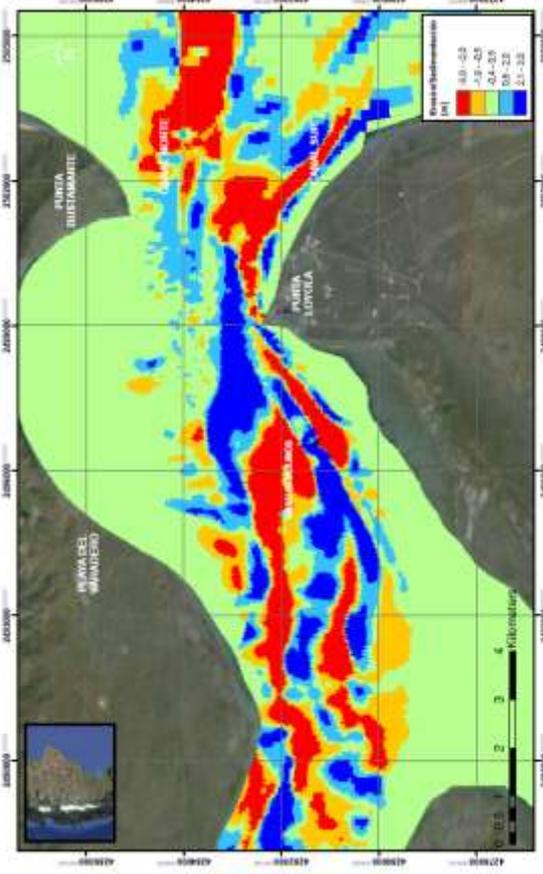
**MAPA N° 5**  
 Simulación de velocidades  
 de flujo



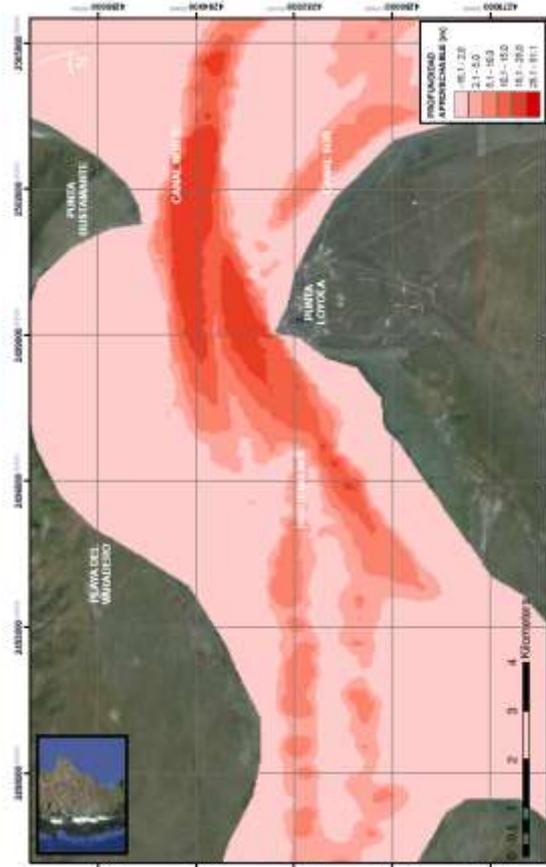
**MAPA N° 6**  
 Simulación de velocidades  
 de flujo



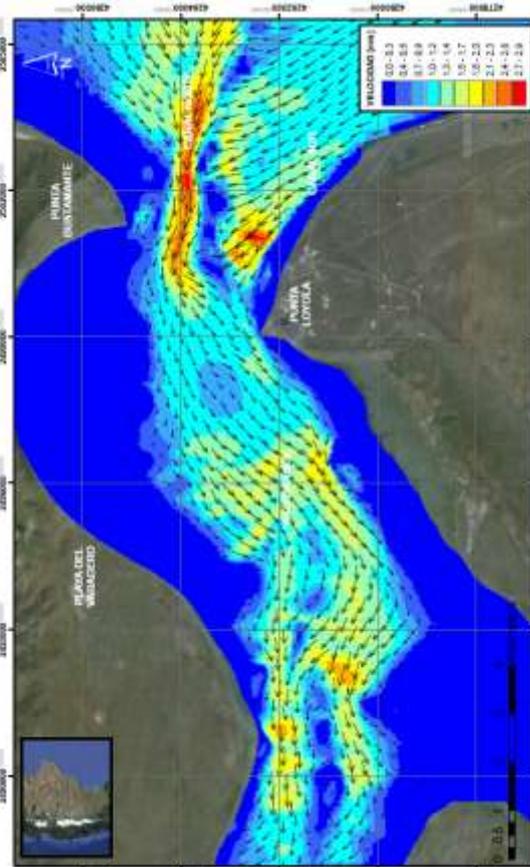
**MAPA N° 7**  
 Datos experimentales obtenidos en obra



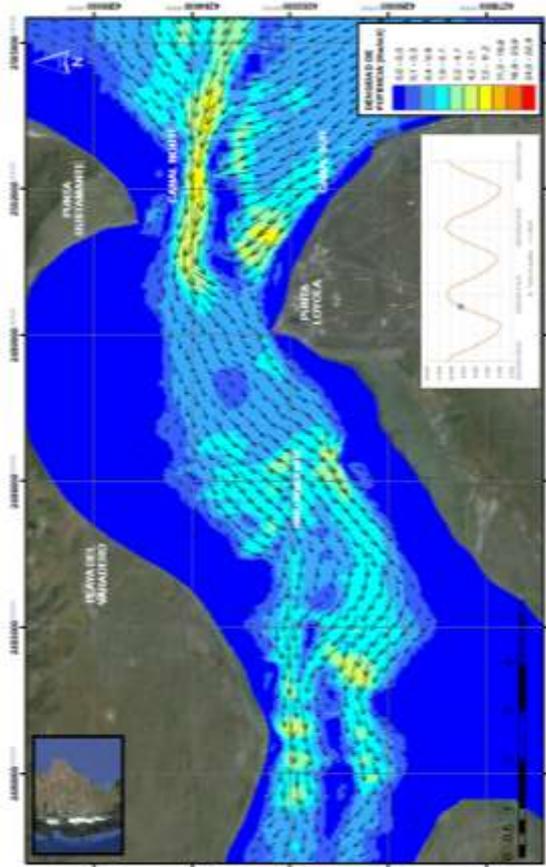
**MAPA N° 8**  
 Datos experimentales obtenidos en obra



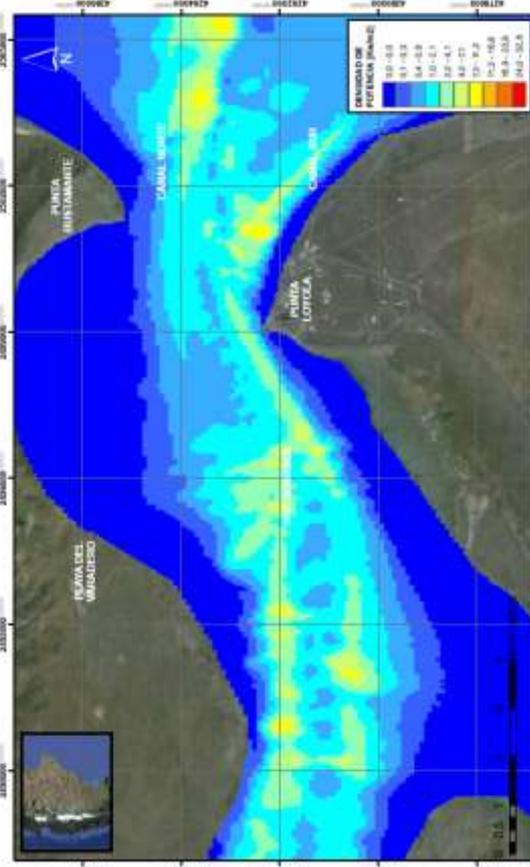
MAPA N° 9  
 Profundidad aproximada  
 Fuente imagen de fondo: Google Earth  
 Proyección: POGSAR 2007 Zone 2  
 Fecha: 08/04/2016



MAPA N° 10  
 Velocidades instantáneas  
 Fuente imagen de fondo: Google Earth  
 Proyección: POGSAR 2007 Zone 2  
 Fecha: 08/04/2016



MAPA N° 11  
 Dirección de potencia  
 Fuente imagen de fondo: Google Earth  
 Proyección: POGSAR 2007 Zone 2  
 Fecha: 08/04/2016



MAPA N° 12  
 Dirección de potencia  
 Fuente imagen de fondo: Google Earth  
 Proyección: POGSAR 2007 Zone 2  
 Fecha: 08/04/2016