

# Evaluación del potencial energético de corrientes de marea en el estuario del río Santa Cruz

*Lucas Bindelli<sup>1,2</sup>, Leandro Kazimierski<sup>1,2</sup>, Nicolás Badano<sup>1,2</sup>, Mariano Re<sup>1,2</sup>, Martín Sabarots Gerbec<sup>1,2</sup> y Nicolás Tomazin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires

<sup>2</sup> Instituto Nacional del Agua

E-mail: lucasbinde@hotmail.com

## RESUMEN:

En los últimos años se han desarrollado distintas formas de aprovechar la energía del océano ante la necesidad de fuentes alternativas. En la actualidad, la opción más desarrollada es la energía hidrocínética que tiene como mecanismo de acción a las corrientes de marea.

Este aprovechamiento es relativamente nuevo y está siendo investigado, desarrollado e incluso aplicado por un centenar de organizaciones en todo el mundo, pero aún es poco lo que se conoce en cuanto a las zonas de aplicación de este tipo de soluciones. Sin embargo, tanto características geográficas de la zona de estudio como aspectos socio-políticos mundiales y locales provocan la necesidad de estudiar esta nueva forma de producir energía.

En el presente trabajo se busca determinar la viabilidad técnica de este aprovechamiento en el estuario del río Santa Cruz, Argentina. Para ello, se realizó una modelación numérica que mediante el procedimiento de anidados permitió trasladar la onda de marea desde mar abierto hasta la boca del estuario y sus zonas aledañas. De esta manera fue posible representar el fenómeno en cuestión y estimar la cantidad de energía efectivamente aprovechable.

Estos resultados se obtuvieron mediante la selección de un generador acorde a las condiciones físicas del estuario, adoptando una cantidad y planteando una distribución de estos equipos en las zonas de mayor disponibilidad energética. Los resultados obtenidos son alentadores en cuanto a la viabilidad técnica del aprovechamiento, por lo menos en una primera aproximación. Esto lleva a querer continuar profundizando el estudio del aprovechamiento, ya que resulta incluso competitivo respecto de soluciones similares como son los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos.

## INTRODUCCIÓN

Considerando diversos eventos observables en la época como el aumento de la temperatura media del planeta, el derretimiento de los glaciares, etc. y sus proyecciones futuras (Acuerdo de París, 2015), surge una visión en la que el hombre debe corregir su postura frente a la naturaleza para asegurar un desarrollo sustentable.

De esta forma algunos países desarrollados comenzaron a modificar su matriz energética reemplazando los combustibles fósiles por variantes que restringen la emisión de gases de efecto invernadero. Es así como hoy en día países como Islandia o Noruega son reconocidos mundialmente por su efectiva gestión ambiental, produciendo el 87% en 2014<sup>1</sup> y 98% en 2013<sup>2</sup> de su energía eléctrica respectivamente generada por fuentes renovables.

Ahora bien, en países en vías de desarrollo este cambio comenzó más tarde, principalmente debido a los elevados costos de estas alternativas energéticas que fueron disminuyendo con los años gracias al avance tecnológico. Por ejemplo, en 2007 Costa Rica planteó como objetivo convertirse en un país “Carbono-neutral” para el 2021. Hoy en día satisface el 98,6% de su demanda eléctrica con fuentes renovables<sup>3, 4</sup>.

En lo que respecta a Argentina, hasta el año 2015 la incidencia de las energías renovables en la matriz de generación eléctrica era de apenas un 2%. Es por eso que en ese año se dio inicio al programa RenovAr, que fomenta la aplicación de métodos sustentables para la producción energética con el objetivo de amentar al 20% aquella incidencia para el año 2025. Sin embargo, los 147 proyectos adjudicados a la fecha pueden clasificarse en cinco tipos de soluciones: Eólica, Solar, Biomasa, Biogás y Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos (PAH).

De aquí surge la necesidad de buscar nuevas alternativas, ya que la base de una sólida matriz energética sustentable yace en la diversidad de sus componentes. Sólo de esta manera es posible compensar las marcadas falencias que tiene cada una de las alternativas en forma individual.

Este trabajo busca profundizar sobre la viabilidad técnica de una de estas alternativas, conocida como energía hidrocinética.

---

<sup>1</sup> Iceland National Authority (NEA): <http://www.nea.is/the-national-energy-authority/energy-statistics/primary-energy/sources-of-energy/>

<sup>2</sup> <https://www.regjeringen.no/en/topics/energy/renewable-energy/renewable-energy-production-in-norway/id2343462/>

<sup>3</sup> <http://gobierno.cr/tag/matriz-energetica/#>

<sup>4</sup> [https://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca\\_virtual/016/H\\_CAP\\_6\\_16.pdf](https://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/016/H_CAP_6_16.pdf)

## ENERGÍA HIDROKINÉTICA

### *Concepto*

La energía hidrocínética consiste en aquella parte de la energía que se encuentra en el movimiento del agua. Cuando se habla de esta como aprovechamiento energético, el movimiento del agua corresponde a generado por las corrientes de marea, es decir, las corrientes que se generan por las sucesivas variaciones del nivel del mar.

Existe una ecuación que relaciona el movimiento del fluido con la energía cinética que este contiene, que puede escribirse como:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Con:

m: masa de agua

v: velocidad del escurrimiento

Dado que la masa es el volumen de agua multiplicado por su densidad, y que la potencia puede expresarse como:

$$P = \frac{E_c}{t} \quad (2)$$

Si se aplican ambos conceptos a la primera ecuación, se obtiene:

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

Ecuación que permite relacionar la potencia por unidad de área teórica que puede obtenerse a partir de la velocidad del fluido.

Luego, si lo que interesa es saber cuál es la energía presente en el desplazamiento del agua en un determinado período de tiempo, resulta:

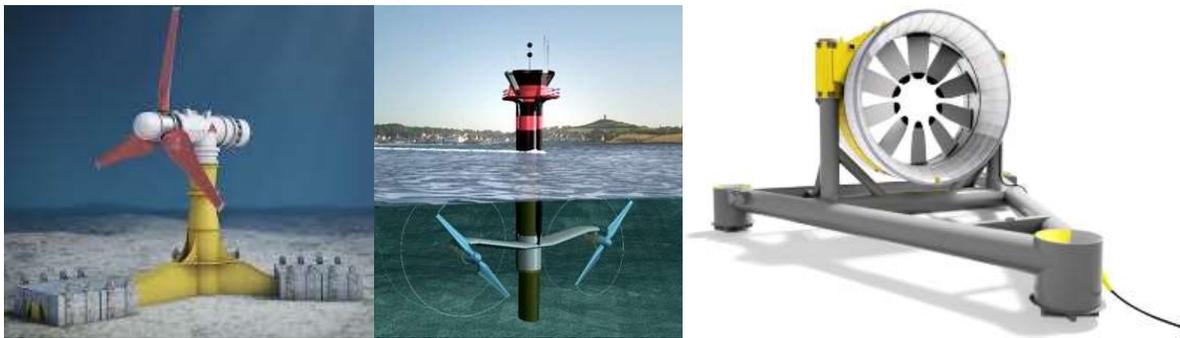
$$\frac{E}{A} = \int_0^t \frac{P}{A} dt = \int_0^t \frac{1}{2}\rho v^3 dt \quad (4)$$

Esta es la ecuación de la energía hidrocínética del fluido, por unidad de área que este atraviese. Es importante remarcar que la relación de la energía con la velocidad es al cubo, por lo que, para una misma masa de agua, el doble de velocidad implica una energía disponible ocho veces mayor.

### Generación

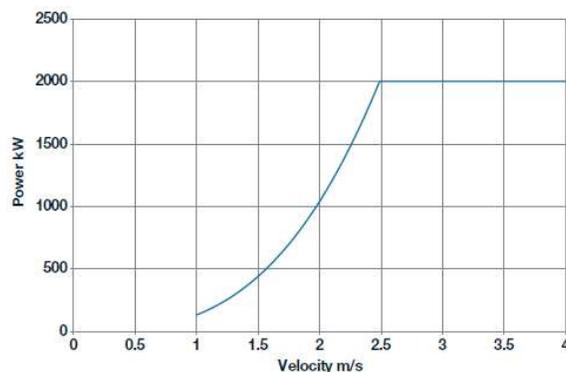
El método utilizado para extraer la energía hidrocínética del agua en movimiento es similar al utilizado en los sistemas de energía eólica: se ubica un generador en aquellos puntos en los que hay mayor energía disponible, generando que el flujo ponga en movimiento el rotor del dispositivo, produciendo energía eléctrica.

Siendo esta una tecnología todavía en etapa de desarrollo para el caso de los generadores hidrocínéticos, hoy en día existe una gran variedad de dispositivos en el mercado, cada uno con sus mecanismos de acción propios (Figura 1).



**Figura 1.-** Generadores hidrocínéticos. De izquierda a derecha: AR1500, SeaGen, Cape Sharp Tidal.

Sin embargo, todos ellos tienen una característica en común, que es la curva de potencia eléctrica generada en función de la velocidad del fluido (Figura 2).



**Figura 2.-** Curva de Potencia generada vs. Velocidad del escurrimiento. Fuente: Folleto del generador SeaGen-S.

En la imagen anterior puede verse como para velocidades inferiores a un cierto valor (en este caso, 1 m/s) no hay generación, mientras que para valores muy elevados (en este caso 2,5 m/s) la potencia se mantiene constante. Lo primero ocurre debido a que hace falta una mínima cantidad de energía para

poner en marcha al dispositivo y lo segundo se hace como medida de seguridad, para no dañar las componentes internas del equipo.

Por último, cabe mencionar que la ecuación (4) se ve modificada al querer extraer esa energía del seno del fluido, resultando:

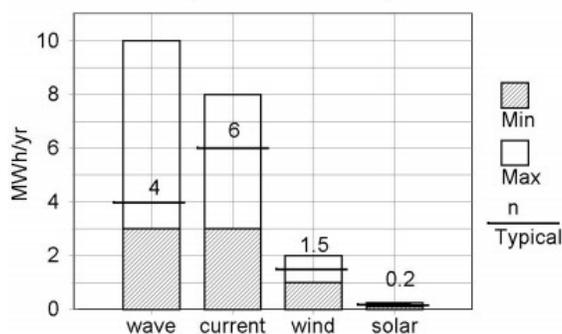
$$\frac{E}{A} = Cp \int_0^t \frac{1}{2} \rho v^3 dt \quad (5)$$

Siendo Cp el coeficiente de potencia del generador, que pone en evidencia la cantidad de energía que este puede efectivamente aprovechar del escurrimiento.

### Ventajas

La energía hidrocinética presenta algunas características de gran valor para lo que se busca en un aprovechamiento sustentable. Por un lado, se trata de una fuente inagotable (en el tiempo) de energía, puesto que las corrientes de marea existirán mientras siga existiendo el fenómeno de la marea. Por otro lado, el comportamiento de las mareas es bien conocido por el hombre, quien logró descifrar cómo se traduce en el movimiento del agua la posición relativa entre esos tres cuerpos celestes. De aquí resulta que es posible predecir con gran precisión cuál será el nivel del mar en un determinado tiempo en el futuro. Si se logra relacionar las velocidades de desplazamiento de la masa de agua con los niveles anteriores, es posible determinar cuánta energía se puede extraer del medio con igual antelación. Es decir, se trata de un aprovechamiento predecible.

A esto puede añadirse la eficiencia espacial de los generadores, que como puede observarse en la Figura 3, presentan las mejores relaciones entre la energía anual capturada y el tamaño de los dispositivos utilizados para tal fin.



**Figura 3.-** Cantidad de energía captada por unidad de medida del dispositivo. Fuente: Cátedra de Energías Renovables, Unidad 9: Energías Marinas, UTN.

Por último, los resultados de diversos estudios de impacto ambiental han sido hasta el momento muy prometedores, reflejando bajas modificaciones hidrodinámicas del entorno, bajo impacto sonoro y nulas colisiones con mamíferos marinos (Copping *et. al*, 2015).

## ZONAS DE ESTUDIO

Se estima que la energía teórica de mareas en el mundo, teniendo en cuenta la variación de amplitud y las corrientes que estas producen es de unos 3 TW, resultando de 1 TW para las zonas de aguas poco profundas (Charlier & Justus, 1993). Ahora bien, puede concluirse de los apartados anteriores que los aprovechamientos hidrocineéticos no pueden ubicarse en cualquier lugar, sino que requieren de corrientes de marea que posean un rango óptimo de velocidades, que para la mayoría de los generadores ronda entre 1 m/s y 4 m/s.

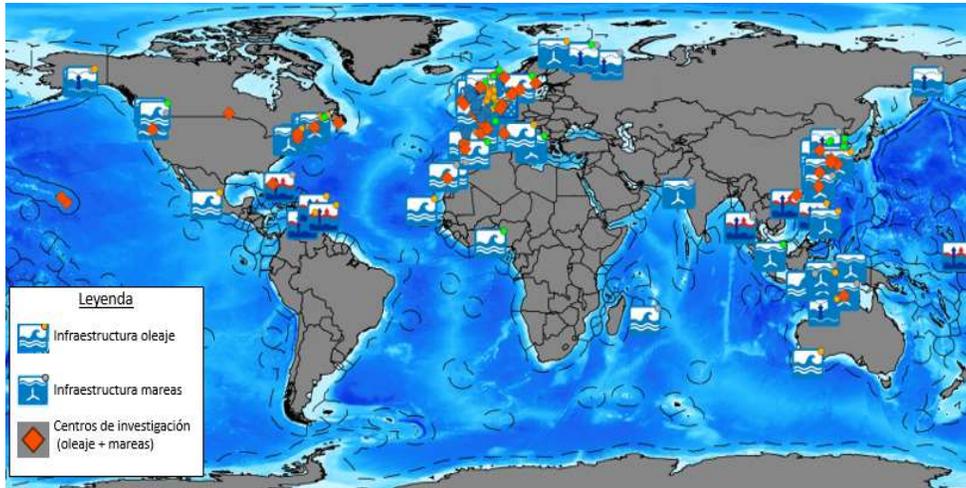
Estas velocidades sólo ocurren en zonas muy acotadas del planeta, en las que se alcanzan elevadas amplitudes de marea (> 5 metros). La relación entre la amplitud de la marea y la velocidad del escurrimiento surge de aplicar el concepto de conservación de la cantidad de movimiento, ya que grandes variaciones del nivel del mar implican el movimiento de una gran masa de agua. Para que ello ocurra dentro de un ciclo de marea, el agua debe desplazarse a velocidades mayores que en las zonas en las que las amplitudes son menores.

De esta manera, resulta que los principales puntos de interés para este tipo de aplicaciones serán aquellos en donde se presenten amplitudes medias macro-mareales (> 5 metros). En la imagen siguiente se destacan los lugares en el mundo en los que se pueden encontrar las mayores amplitudes.



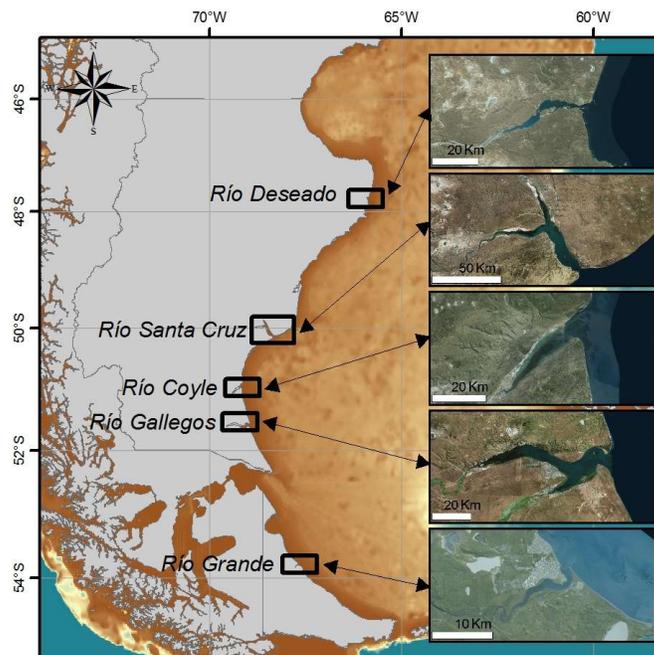
Figura 4.- Potencial hidrocineético en el mundo.

Si se observa la figura siguiente, resulta que son esos mismos puntos los que actualmente tienen mayor atención en cuanto al estudio y desarrollo de proyectos de energía hidrocineética.



**Figura 5.-** Proyectos de energía undimotriz (oleaje) e hidrocínética (mareas) en el mundo.

La costa atlántica austral Argentina se caracteriza por sus elevadas amplitudes de marea, por lo que resulta de interés para analizar este tipo de aprovechamientos. Para determinar las posibles zonas de aplicación se realizó un estudio preliminar en función de la energía teórica disponible a partir de la amplitud de marea del lugar. De esta manera se obtuvieron cinco estuarios patagónicos como potenciales sitios de aplicación. En la Figura 6 se puede ver la ubicación de cada uno de ellos, y en la tabla siguiente se describen sus principales características.



**Figura 6.-** Estuarios patagónicos de interés.

**Tabla 1.-** Características principales de los estuarios patagónicos de interés.

<b>Estuario</b>	<b>Río Grande</b>	<b>Río Gallegos</b>	<b>Río Coyle</b>	<b>Río Santa Cruz</b>	<b>Río Deseado</b>
Dimensiones aproximadas	4 km x 0,3 km	35 km x 3 km	20 km x 1 km	40 km x 5 km	25 km x 2 km
Ancho de la boca	400 m	4.000 m	4.600 m	2.100 m	1.200 m
Amplitud media 2016	5,6 m	8,37 m	7,70 m	8,11 m	3,68 m
Amplitud máxima 2016	8,53 m	13,03 m	-	12,63 m	5,77 m
Descarga fluvial significativa	NO	NO	NO	SI	NO
Infraestructura cercana	SI	SI	NO	SI	SI
Potencial energético (Estimaciones de energía mareomotriz)	140 MW	900 MW	159 MW	2420 MW	180 MW

De todos ellos, se decidió realizar un estudio en detalle del estuario del río Santa Cruz, por presentar el mayor potencial disponible junto con otras características buscadas, como la presencia de puntos de consumo cercanos y profundidades adecuadas (> 20 metros).

## MODELACIÓN NUMÉRICA

La metodología utilizada en este trabajo para cuantificar la energía aprovechable del estuario seleccionado se centró en la modelación numérica de la onda de marea, trasladándola desde mar abierto hasta la boca de este mediante modelos anidados. Para ello se delimitaron cuatro áreas (o Ranks), cada una contenida en la anterior y aproximándose al punto de interés (Figura 7).

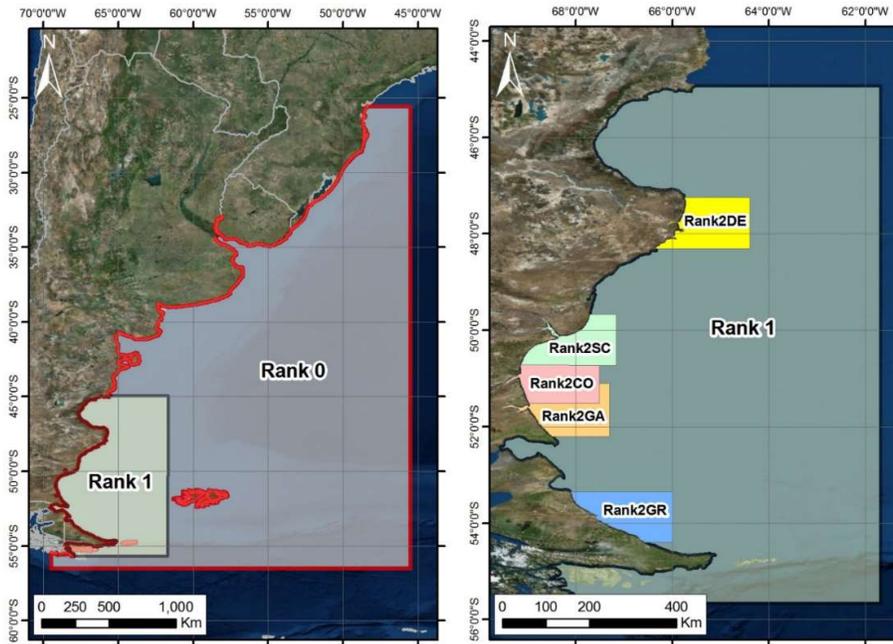


Figura 7.- Extensión de los Ranks utilizados

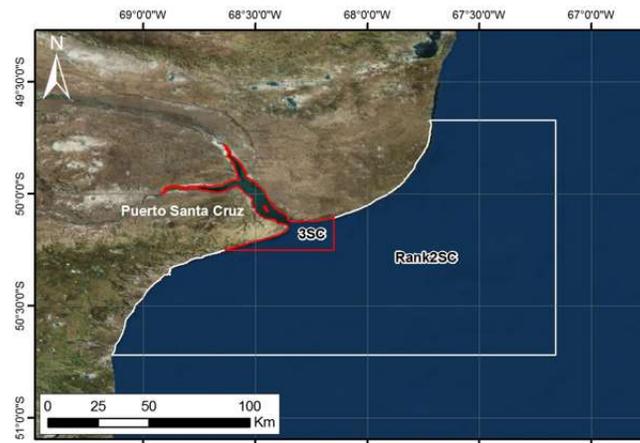


Figura 8.- Extensión de los Ranks utilizados (continuación).

Para cada uno de estos Ranks se generó un modelo que tomaba como condiciones de borde abierto a las series de nivel del mar generadas por el Rank anterior en los puntos coincidentes con la ubicación de estos bordes. Para el caso del Rank 0, al no haber ningún otro Rank que lo contenga, se tomaron como condiciones de borde las 13 componentes de marea principales a partir de lo expuesto en Fernández, 2010. Estas componentes se representan en el modelo cargando los valores de amplitud y fase de cada una de ellas para cada uno de los puntos que conforman el borde abierto. Los valores se obtuvieron del modelo global FES 2014 de AVISO+.

Adicionalmente, cada uno de estos Ranks requirió la confección de su propia grilla cuyas dimensiones de celda se achicaron en cada uno de los pasos, y de una batimetría con precisión acorde a la grilla adoptada generada con la batimetría global GEBCO, cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) e imágenes LANDSAT.

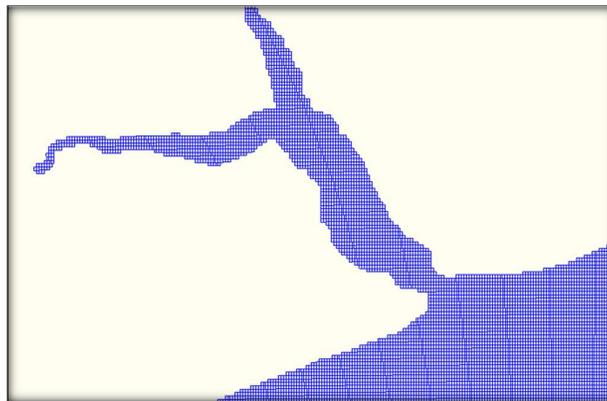


Figura 9.- Grilla adoptada para el estuario del río Santa Cruz, Rank3.

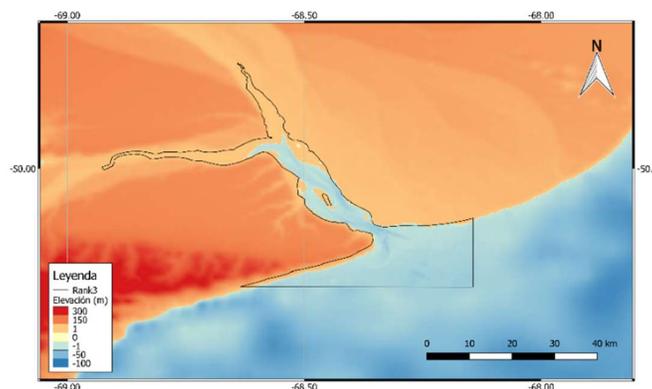
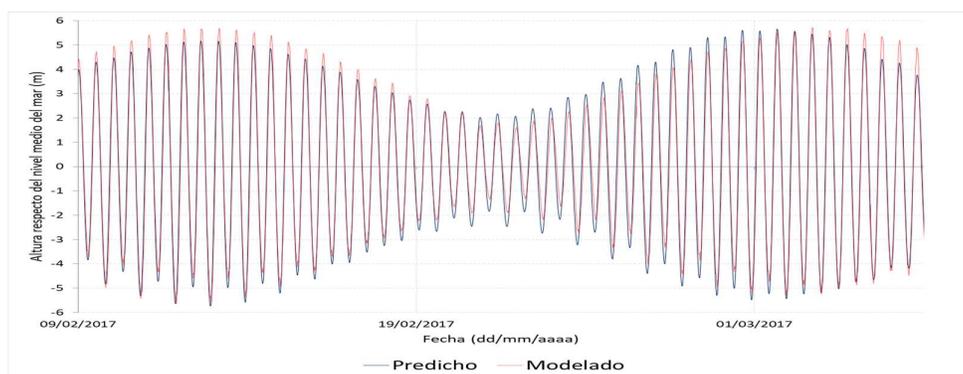


Figura 10.- Batimetría adoptada para el estuario del río Santa Cruz, Rank 3.

### Calibración

Una vez armado cada uno de estos Ranks se los calibró a partir de valores de pleamar y bajamar generados por el SHN de los cuatro puertos principales de Argentina más próximos al área de estudio (Punta Quilla, Puerto Deseado, Puerto San Julián y Punta Loyola). Con estos datos se generó una onda de marea, denominada “Predicha”. Luego, obteniendo la onda de marea “Simulada” por el modelo en esos mismos puntos para distintos valores del coeficiente de Manning y comparándolas con la onda Predicha, se calcularon en cada caso dos indicadores para cuantificar las diferencias obtenidas.

Estos indicadores son el Error Cuadrático Medio (ECM), que permite medir las diferencias entre ambas ondas, y el coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) que da una idea de la correlación entre ellas.



**Figura 11.-** Gráfica de las series Predicha y Modelada, Punta Quilla.

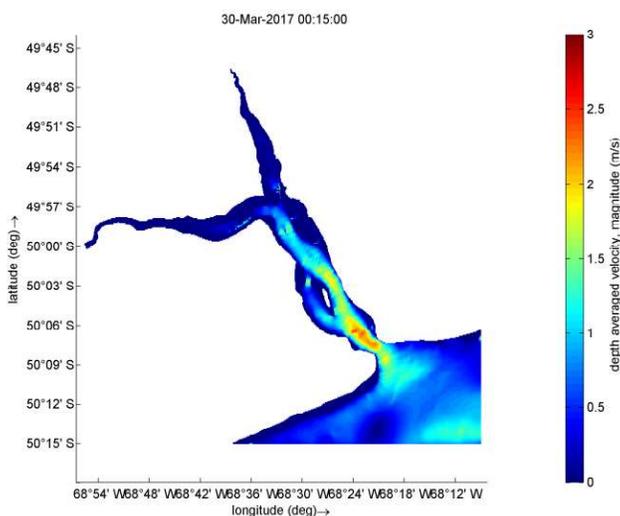
**Tabla 2.-** Valores de los indicadores utilizados para cada puerto y cada Rank, con  $n = 0,015$ .

ECM	Deseado	San Julián	Loyola	Punta Quilla	$R^2$	Deseado	San Julián	Loyola	Punta Quilla
Rank 0	0,094	0,296	0,406	0,373	Rank 0	0,971	0,945	0,957	0,957
Rank 1	0,080	0,251	0,415	0,223	Rank 1	0,975	0,951	0,957	0,975
Rank 2	-	-	-	0,438	Rank 2	-	-	-	0,949
Rank 3	-	-	-	0,316	Rank 3	-	-	-	0,963

Como puede observarse en las tablas anteriores, en el caso de Punta Quilla, que es el puerto situado en el estuario del río Santa Cruz, el ECM oscila alrededor de los 30 cm, mientras que el  $R^2$  lo hace alrededor del 96%.

## Resultados

Una vez calibrado el modelo se procedió al análisis de resultados. En la imagen siguiente puede observarse una marcada región en la que las velocidades de la corriente de marea superan los 2 m/s, tanto con el ingreso de la onda de marea como con su egreso. De esta manera se obtuvo un primer indicio de la mejor ubicación del aprovechamiento.

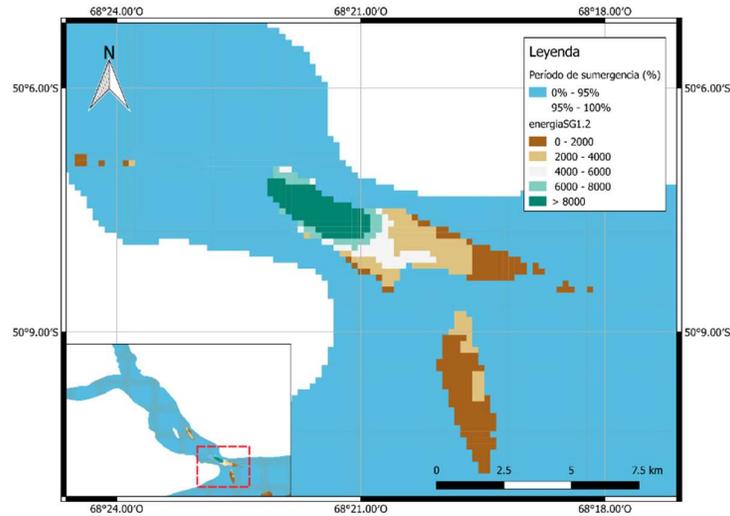


**Figura 12.-** Velocidades de la corriente de marea en el estuario del río Santa Cruz.

## ENERGÍA APROVECHABLE

A partir de los resultados obtenidos por el modelo y de las características morfológicas del estuario se seleccionaron seis generadores que actualmente están siendo utilizados en algún proyecto o que por lo menos está en etapa de prueba con prototipos en escala 1:1. Esto permite dar una mayor veracidad al análisis efectuado, ya que permite contar con datos reales.

Para los seis generadores se calculó en cada celda del Rank 3 (que abarca únicamente la boca del estuario y su interior) la energía teórica aprovechable. Luego se discretizaron los resultados en cinco categorías, en función de la cantidad de energía y se eliminaron aquellas celdas que implicaban que el generador no estuviese sumergido al menos el 95% del tiempo (Figura 13). Esta última condición es relevante para evitar deterioros de las hélices a velocidades mayores a las supuestas por cambios de medio.



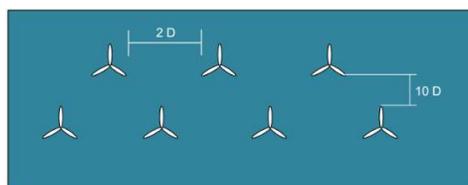
**Figura 13.-** Energía teórica aprovechable en el estuario del río Santa Cruz, generador SeaGen.

Se optó finalmente por el generador SeaGen (Figura 14), no sólo por presentar una de las mayores cantidades de celdas con más de 8000 kW.hr/año, sino que también por tener un mecanismo que permite elevar las hélices por fuera del agua y así simplificar las tareas de operación y mantenimiento.



**Figura 14.-** Generador SeaGen

De esta manera, se utilizó el mismo criterio de distribución que en el caso de los generadores eólicos y se los ubicó a trespelillo, respetando las distancias mínimas que se muestran a continuación.

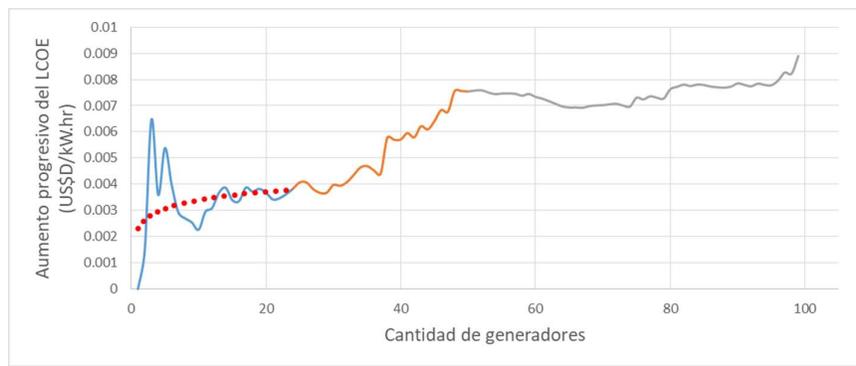


**Figura 15.-** Distancias mínimas y distribución de los generadores hidrocínicos.

Luego, calculando el costo de energía de cada generador (LCOE) según lo dispuesto por la IEA (International Energy Agency, 2015) se graficó la curva incremental del costo de la energía en función de la cantidad de generadores. El costo de la energía se calculó a partir de:

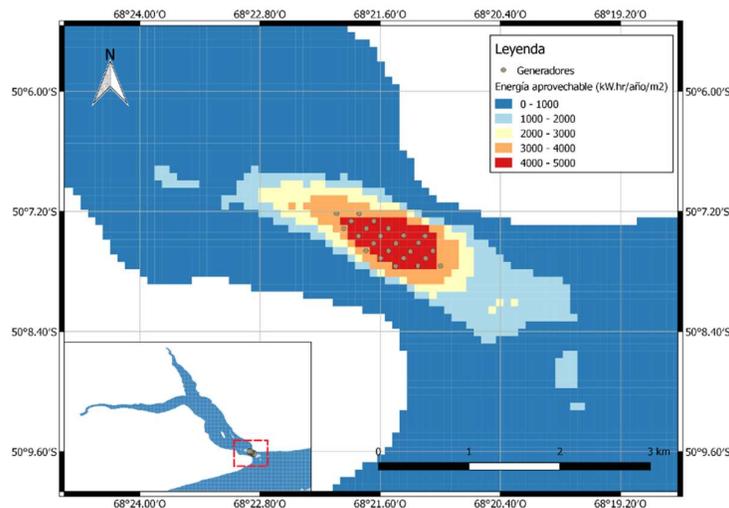
$$LCOE = \frac{CAP + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Annual\ Energy\ Production_t}{(1+r)^t}} \quad (6)$$

El resultado obtenido fue el siguiente gráfico, que marca tres tendencias distintas. Se consideró que adoptar 24 generadores era una cantidad adecuada para este caso de estudio, puesto que a partir de ese número, el costo incremental aumentaba considerablemente.



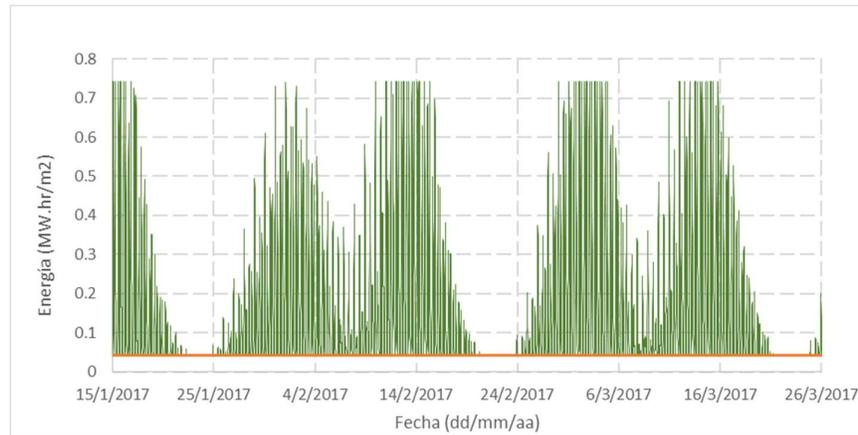
**Figura 16.-** Aumento progresivo del costo de energía en función de la cantidad de generadores implantados.

De esta manera y considerando las pérdidas por extracción de energía para el generador adoptado ( $C_p = 0,45$ ) se situó a los 24 dispositivos como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 17.-** Ubicación de los 24 generadores utilizados.

Si además se tiene en cuenta la curva de Potencia vs. Velocidad del escurrimiento del SeaGen, junto con las pérdidas de la transformación de energía mecánica en energía eléctrica, se obtiene para cada generador una curva como la que se observa en la figura 18.



**Figura 18.-** Curva de generación de energía en función del tiempo para un generador SeaGen ubicado en el estuario del río Santa Cruz.

Dado que el generador no produce energía para velocidades menores a 1 m/s y tiene una generación máxima para velocidades de 2,5 m/s resulta que el gráfico anterior presenta dos límites bien definidos, uno inferior y otro superior.

Teniendo en cuenta los 24 equipos y sus respectivas curvas de generación, resulta que se pueden producir unos 37,01 GW.hr/año, que si se considera un consumo medio por persona de 2,62 MW.hr/año, resulta el equivalente al consumo de energía eléctrica de unas 14.126 personas.

## REFERENCIAS

R. H. Charlier, J. R. Justus, 1993. *Ocean Energies: Environmental, Economic and Technological aspects of Alternative Power Source*.

A. Copping et. Al., 2016. *Annex IV 2016 – State of the science report: Environmental effects of Marine Renewable Energy Development around the world*.

M. Fernández, 2011. *Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del océano Atlántico*.

International Energy Agency, 2015. *International levelised cost of energy for ocean energy technologies*.