



Universidad Veracruzana

Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías

Región Veracruz

Maestría en ecología y pesquerías

Evaluación del potencial energético de un estuario de cuña de salina (Río Jamapa)

Tesis para obtener el grado de Maestra en Ecología y pesquerías

Presenta:

QFB Catalina Osorio Corro

Director:

Dr. Mark Marín Hernández

Asesores:

Dr. David Salas Monreal

Dra. Rosario Sanay Gonzáles

Elija el mes de 2023

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías
Región Veracruz

Maestría en Ecología y Pesquerías

Evaluación del potencial energético de un estuario de cuña
salina (río Jamapa)

Tesis para obtener el grado de Maestra en
Ecología y pesquerías

Presenta:
Catalina Osorio Corro

Director:
Dr. Mark Marín Hernández

Asesores:
Dr. David Salas Monreal
Dra. Rosario Sanay Gonzáles

Índice

Resumen.....	3
Abstract.....	4
1. Introducción.....	5
2. Antecedentes.....	13
3. Pregunta de Investigación.....	16
4. Hipótesis.....	16
5. Objetivo.....	16
5.1 Objetivo General.....	16
5.2 Objetivos específicos.....	16
6. Justificación.....	17
7. Área de Estudio.....	17
8. Datos.....	19
8.1 Datos Hidrológicos y Meteorológicos.....	20
8.2 Datos hidrográficos.....	20
9. Metodología y Resultados.....	23
9.1 Diagrama de flujo de la metodología.....	23
9.2 Análisis de la Descarga del Río.....	23
9.4 Serie Temporal de Temperatura y Salinidad Superficial.....	36
9.5 Análisis de las Series de Tiempo de Salinidad y Temperatura de los CTD anclados.....	38
9.6 Análisis Espectral de las Series de Tiempo.....	40
9.7 Análisis de Alta Frecuencia.....	41
9.8 Análisis espectros cruzados de alta frecuencia.....	42
9.9 Análisis de Baja Frecuencia.....	44
10. Potencial teórico de Energía de Gradiente salino.....	46
11. Discusión.....	55
12. Conclusiones.....	60
13. Bibliografía citada.....	61

Índice de figuras

Figura 1. a) prototipo del equipo de Ósmosis a Presión Retardada (PRO) y b) prototipo del equipo de electrodiálisis inversa (RED) (Logan y Elimelech, 2012).....	8
Figura 2 Clasificación de estuarios con base a su estructura vertical de salinidad a) Cuña de sal, b) Fuertemente estratificado, c) Débilmente estratificado y d) Bien mezclado (Cameron y Pritchard, 1963).	10
Figura 3 Estuario de cuña salina, a) comportamiento de las isohalinas en relación con la cercanía de la boca y la profundidad b) haloclina y c) circulación general (Ibáñez et al., 2009).	11
Figura 4 Localización e hidrografía de la cuenca del río Jamapa, y localización de estaciones hidrologicas. (INECC, 2017)	19
Figura 5 Localización de los sitios donde se realizaron los lances de CTD del proyecto MOHICOVER a lo largo del río Jamapa.....	21
Figura 6. Localización de los sitios donde fueron instalados los anclajes (CTD DIVER) a lo largo del río Jamapa.....	22
Figura 7. Correlación entre descarga del río y escala del río para las estaciones hidrográficas a) Paso del Toro, b) El Tejar.....	25
Figura 8. Descarga mensual promedio del río Jamapa para los años 1952-2019 (línea azul), con su error estándar y del año 2019 (línea roja) y su error estándar.	26
Figura 9. Promedio diario de la Descarga del río Jamapa para el año 2019.....	27
Figura 10. Perfiles verticales de salinidad de lances de CTD del MOHICOVER, para los meses de: a) enero, b) febrero y c) mayo. Los círculos amarillos corresponden a la estación donde se realizó el lance y las líneas rojas verticales muestran donde se localizan los cuatro anclajes.....	29
Figura 11. Perfiles verticales de temperatura de lances de CTD del MOHICOVER, para los meses de: a) enero, b) febrero y c) mayo. Las líneas rojas verticales muestran donde se localizan los cuatro anclajes.	33
Figura 12. Promedios mensuales superficiales mensuales de los lances del MOHICOVER del periodo 2015-2019 en los sitios SUP1, SUP2, SUP3 y SUP4 de a) salinidad y b) temperatura.	37
Figura 13. Series de tiempo diarias en los sitios SUP1, SUP2, SUP3 y SUP4 de a) salinidad y b) temperatura a 0.20 m.....	38
Figura 14. Series de tiempo de salinidad (a) y temperatura (b), donde las líneas representa a cada uno de los anclajes: ANC1 (rojo), ANC2 (azul), ANC3 (magenta), ANC4 (verde)	39
Figura 15 Espectros de potencia de la salinidad de los 4 anclajes y magnitud del viento	42
Figura 16. . Coherencia entre la salinidad de cada uno de los anclajes con respecto a la magnitud del viento; la línea segmentada indica el nivel de coherencia significativa al 95%	43
Figura 17. Espectros de potencia de la descarga de los 4 anclajes.....	44
Figura 18. Coherencia entre la salinidad de cada uno de los anclajes con respecto a la descarga del río; la línea segmentada indica el nivel de coherencia significativa al 95%	45
Figura 19. Energía teórica de gradiente salino en los 4 anclajes.....	50
Figura 20. Energía teórica de gradiente salino en los 4 anclajes en kWh ⁻¹	52
Figura 21. Energía teórica de gradiente salino en los 4 anclajes en kWhmes ⁻¹	53

Agradecimientos

Esta tesis se realizó con el apoyo del fondo CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, proyecto FSE-2014-06-249795 Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE Océano).

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo con la beca nacional con número de becario 960456, que me fue otorgada para la realización del grado

A la universidad Veracruzana- Posgrado de ecología y pesquerías por su respaldo en este logro académico, al igual que mi director el Dr. Mark Marín por direccionarme correctamente en este proyecto, así como a mis asesores, el Dr. David Salas, Dra. Rosario Sanay por todas las aportaciones que hicieron a la tesis con el fin de concretarlo más.

A mis compañeras de generación Kenia, Marcela y Rosa, por ser tan agradables y unidas, fue grato el haberles conocido.

Al igual que a mi familia, madre y hermanas por su apoyo siempre.

*Muchas gracias,
Catalina Osorio.*

Resumen

Debido a la alta demanda de energía y a el aumento de problemas ambientales, se han buscado alternativas, para disminuir las emisiones CO₂. Por lo que han aumentado los estudios en el área de energías renovables y limpias, con el proposito de depender menos de las energías producto de combustión de hidrocarburos, las energías renovables más utilizadas actualmente son: la solar, la hidroeléctrica, y la eólica. En años recientes se ha impulsado el estudio y utilización de fuentes de energía renovable provenientes del océano, este trabajo se centra en evaluar la energía que se obtiene de la mezcla de dos masas de agua con diferente salinidad, llamada energía de gradiente salino, para esto se seleccionó el estuario del rio Jamapa, en Veracruz, el cual está clasificado como un estuario de cuña de sal. Con el fin de conocer su potencial energético teórico, se analizó a lo largo de un año y en cuatro sitios a lo largo de los primeros 5 km del estuario, la variabilidad de la salinidad y la temperatura, así como la relación de estas variables con diferentes forzamientos, utilizando series datos de CTDs anclados en el fondo, lances de CTD a lo largo del estuario, descarga del rio, marea, magnitud y dirección del viento. Posteriormente se calculó el potencial teórico de energía de gradiente salino en los cuatro sitios. Los resultados muestran que para frecuencias altas (<36h), el principal forzamiento fue la marea (armónicos M2, K1 y O1) y el viento; para frecuencias bajas (>36h) el principal forzamiento fue atribuido a la descarga del rio en las bandas de 6, 10-11, 16-18 días. El potencial teórico de energía por gradiente salino, mostró una variabilidad anual (secas-lluvias), en donde el sitio mas alejado de la boca fue el que presentó la energía teórica mas alta 2,950.0 KWh⁻¹..

Palabras clave : Energía de gradiente salino, estuarios de cuña salina, potencial energético.

Abstract

Due to the high demand of energy and the increase in environmental problems, alternatives have been sought to reduce CO₂ emissions. Therefore, studies in renewable and clean energy have increased, with the purpose of depending less on the energy produced by the combustion of hydrocarbons, the most widely renewable energies currently used are: solar, hydroelectric, and wind. In recent years, the study and use of renewable energy sources from ocean has been promoted, this work focuses on evaluating the energy obtained from the mixture of two masses of water with different salinity, called salinity gradient energy. The estuary of Jamapa river in Veracruz, which is a salt wedge estuary, was selected in order to know its theoretical energy potential, the variability of salinity and temperature was analyzed over a year and in four sites along the first 5 km of the estuary, as well as the relationship of these variables with different forcings, using data series from bottom-moored CTDs, CTD sets along the estuary, river discharge, tide, wind magnitude and direction. Subsequently, the theoretical potential energy of the salinity gradient energy at the four sites was calculated. The results show that for high frequencies (<36h), the main forcing was the tide (M2, K1 and O1 harmonics) and the wind; for low frequencies (>36h) the main forcing was attributed to the discharge of the river in the bands of 6, 10-11, 16-18 days. The theoretical energy potential by salinity gradient energy, showed an annual variability (dry-rainy seasons), where the site furthest from the mouth was the one that presented the highest theoretical energy 2,950.0 KWh⁻¹.

1. Introducción

Desde la aparición del hombre, se han utilizado diversas fuentes de energía para su bienestar, siendo en un principio su fuente primaria la energía del sol. Con el paso del tiempo fueron desarrollando y utilizando otras fuentes de energía como; la combustión del carbón, la energía hidráulica, la energía eólica, la combustión del petróleo y la energía nuclear (Roldán, 2013), lo anterior buscando cubrir la creciente demanda de energía que exigía (y sigue exigiendo) el crecimiento y desarrollo de una sociedad moderna y su tecnología. Los combustibles fósiles han cubierto la mayor parte de esta demanda energética alrededor del mundo, se estima que al 2011 el 81.2% de la energía consumida por la humanidad provino de esta fuente. Para el caso particular de México, los combustibles fósiles suministraron, al 2011, el 91.2% de la demanda energética (SENER, 2012).

Hoy en día se siguen explorando nuevas fuentes de energía, no solo por la creciente demanda estimada (cuya tasa de crecimiento anual es del 1.8%, al 2030), sino por los problemas ambientales que han ocasionado algunas de las fuentes utilizadas. Por ejemplo, el uso de combustibles fósiles ha sido identificado como el responsable del cambio climático (Roldán, 2013), lo anterior detonado por el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (producto de la combustión), lo que desencadena problemas ambientales, los cuales buscan minimizar (SENER, 2012). Es decir, el hombre explora nuevas fuentes de energía con la finalidad de cubrir la creciente demanda, pero sin aumentar (o por lo menos minimizar) los impactos negativos al medio ambiente, principalmente, lo que busca es disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Roldán, 2013).

Energías renovables

Dentro de las alternativas, hasta hoy exploradas, para la generación de energía y disminución de emisiones de CO₂, se encuentra el uso de “las energías renovables”, definidas como energía obtenida desde la naturaleza y que es inagotable, autosustentable (Castell, 2012). Se estima que hasta un 25% de la energía demandada por la sociedad actual, puede ser aportada

por este tipo de energías (Cipollina *et al.*, 2016), además que, su producción, distribución, almacenamiento y conversión a otras formas de energía, prevé ser la forma más efectiva de reducir las emisiones de CO₂. Las energías renovables más populares y utilizadas con éxito a la fecha son: la radiación solar, el viento, el curso del agua y la geotérmica (Spiegeler, *et al.*, 2016). De estas, la que se ha utilizado extensivamente es la energía solar, esto dado a su gran potencial por un lado (en promedio, cada metro cuadrado de tierra recibe 1.367 kWm^{-2}) y a su cobertura global por el otro. La radiación solar es convertida en energía eléctrica al concentrarla en celdas o cilindros fotovoltaicos para su uso diario (Oviedo *et al.*, 2015).

Otras clases de energías renovables son las que se obtienen del océano, como son la mareomotriz (provenientes de las mareas), undimotriz (provenientes de las olas), por gradiente térmico y por gradiente salino (EGS). Dado que nuestro país cuenta con una gran extensión litoral, es deseable que se conozca el potencial energético de nuestros mares y costas para en un futuro hacer uso de ello. Dentro de estas fuentes de energía, la EGS es quizá la fuente de energía menos explorada y utilizada en la actualidad, sin embargo, recientes estudios (Cipollina *et al.*, 2016) han evidenciado su gran potencial. En particular, para el estado de Veracruz, donde por un lado la marea y el oleaje no exhiben una gran energía, y por otro los ambientes costeros exhiben fuertes gradientes de salinidad (como resultado de los aportes de los múltiples ríos que descargan al mar), se prevé que la EGS pudiese ser una fuente de energía renovable y es por ello que este trabajo de tesis se centra en explorar esta fuente.

Uno de los mayores retos para el aprovechamiento de las energías renovables de manera rentable y “segura para el medio ambiente”, es el desarrollo de tecnologías que permitan la producción, almacenamiento y conversión de la misma (Sapiña, 2004). Ante la inminente necesidad de reducir y mitigar los efectos negativos en el medio ambiente que ha conllevado el uso de combustibles fósiles como principal fuente de energía, la Organización de las Naciones Unidas creó el pacto de Desarrollo Sostenible, dentro del cual, desde 2008, toma lugar el foro de energías renovables. Dicho foro es utilizado principalmente para la discusión y apoyo para la creación de tecnologías renovables (Skilhagen, 2008).

La energía de gradiente salino también conocida como energía azul, es la obtenida a partir de la mezcla de dos masas de agua de diferente salinidad. La mezcla de las masas de agua genera una liberación de energía impulsada por el diferencial químico entre ellas, donde a su vez el potencial químico es utilizado para generar electricidad. Entre mayor sea la diferencia de salinidad entre las masas de agua involucradas, existirá mayor potencial químico, y por ende mayor generación de energía eléctrica. La EGS es considerada una energía limpia y renovable, ya que no produce ninguna emisión de CO₂ (Cipollina *et al.*, 2016).

Utilizando la estimación hipotética más famosa de descarga total anual de los ríos del mundo, que es de 1.3×10^6 m³, e hipotetizando que ésta fuera utilizada en su totalidad para la generación de EGS a través de su mezcla con agua marina, se obtendrían 2.8 TW, cantidad de energía eléctrica suficiente para cubrir la demanda mundial anual, la cual es de 2.6 TW según Wick (1997).

A la fecha se han explorado exitosamente dos métodos para la generación de energía por gradiente salino, una es basada en ósmosis de presión retardada (PRO por sus siglas en inglés) y la otra es basada en electrodiálisis inversa (RED, por sus siglas en inglés). Ambas metodologías, aunque siguen en la etapa final de desarrollo, han tenido resultados preliminares alentadores (Marín-Coria *et al.*, 2020).

Generación de energía por gradiente salino

La tecnología PRO (Figura 1a) es un proceso donde se obtiene energía a partir de la mezcla de dos soluciones, una de alta concentración salina y otra de menor cantidad, estas soluciones se ponen en contacto mediante una membrana osmótica semipermeable, donde se da el paso de la solución con menor concentración de sal, a la más concentrada. El agua que atraviesa la membrana trae un volumen adicional a la solución más concentrada, que después puede utilizarse en la generación de energía de manera mecánica (Cipollina *et al.*, 2016)

La tecnología RED (Figura 1b) es en la cual la energía de gradiente salino es aprovechada mediante la diferencia del potencial electroquímico, entre las diferencias de soluto (sales) de las dos concentraciones. En donde una solución de alta concentración y la

de menor concentración de sales, es colocada en un arreglo de celdas que están separadas por membranas de intercambio aniónico y catiónico. Los iones pueden permear la membrana de intercambio de iones cargados, y el equilibrio de ambos en una celda dependerá del teorema de exclusión de Donnan, esto es el equilibrio entre los iones separados por una membrana, sobre cada membrana se crea una diferencia de voltaje la cual se acumula con la suma de las membranas, generando una corriente iónica que es convertida a corriente eléctrica por medio de electrodos, la cantidad de energía obtenida depende del tipo de material de la membrana utilizada (Cipollina *et al.*, 2016).

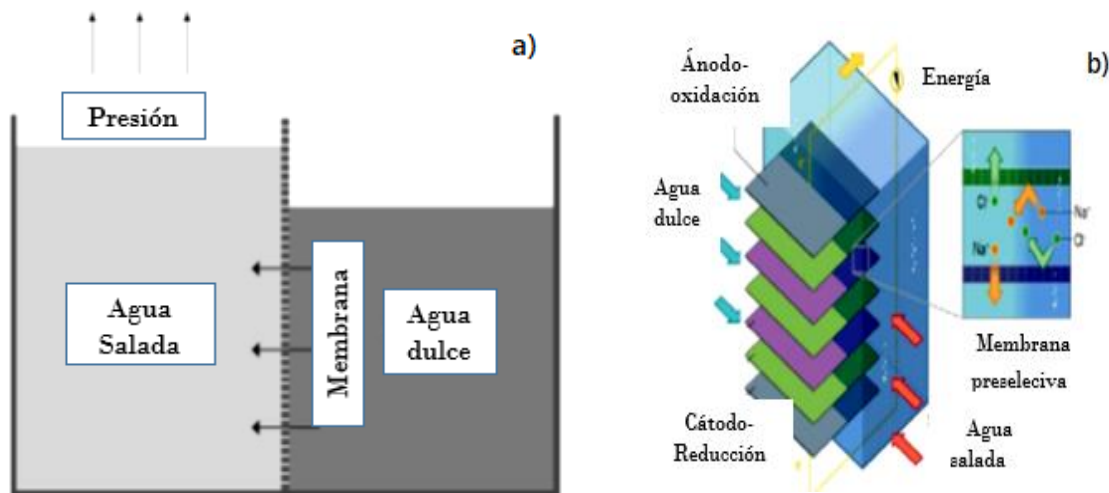


Figura 1. a) prototipo del equipo de Ósmosis a Presión Retardada (PRO) y b) prototipo del equipo de electrodiálisis inversa (RED) (Logan y Elimelech, 2012).

Independientemente del método a utilizar para la generación de energía por gradiente salino, es necesario (por cuestiones de rentabilidad) tener a disposición en un mismo lugar agua con dos diferentes salinidades, de ahí que los sistemas estuarino-lagunares y las desembocaduras de los ríos que descargan directamente al océano, sean los lugares idóneos para este fin. A lo largo del litoral de nuestro país, se ubican más de 120 lagunas costeras (Lankford, 1977; Lara *et al.*, 2011) y más de 51 ríos (SEMARNAT, 2010) que desembocan directamente al mar. En particular, el litoral veracruzano alberga un gran número de estos sistemas (Lankford, 1977; Pereyra *et al.*, 2010; Lara *et al.*, 2014). Aunado a esto, la

plataforma continental frente a Veracruz se caracteriza por ser un ambiente micromareal (amplitud de la marea < 2m), lo que contribuye a que los estuarios, lagunas costeras y sus áreas de influencia (ROFIs, por sus siglas en inglés) permanezcan fuertemente estratificados (Perales-Valdivia *et al.*, 2018), , situación ideal para extraer dos masas de agua de diferente salinidad de un solo sitio.

Estuarios

De acuerdo a Cameron y Pritchard (1963), “un estuario es un cuerpo de agua costera semi-cerrada que tiene libre conexión con el mar y dentro del cual el agua marina está mediblemente diluida con el agua continental ”Esta definición no distingue a las laguna costera, de los fiordos, estuarios de valle inundado o estuarios de desembocadura de ríos, como lo hacen las definiciones que consideran la geomorfología y origen del sistema costero semi-cerrado (Valle-Levinson, 2010). En este trabajo de tesis, se considera la definición de estuario de Cameron y Pritchard (1963).

En general, un estuario se divide en: estuario bajo, donde se encuentra la boca que tiene libre conexión con el mar, y se encuentra dominada por la energía de las olas y de las mareas, el estuario medio que es la parte central, donde se equilibran la influencia marina y fluvial, y por último el estuario alto el cual es dominado por la energía del río, con influencia de la marea pero con escasa (o nula) mezcla (Valle-Levinson, 2010).

Los estuarios se pueden clasificar como verticalmente mezclados, parcialmente mezclados, fuertemente estratificados o de cuña salina (Figura 2), con base en la estructura vertical de salinidad (Valle-Levinson, 2010). La formación de uno u otro tipo de estuario, es el resultado de la competencia entre los agentes de forzamiento externo que promueven la estratificación de la columna de agua (aporte de aguas continentales, radiación solar, evaporación, precipitación) y los agentes externos que promueven la mezcla de la columna de agua (marea, viento, oleaje, entre otros), (Ibáñez, 1997; Geyer y Ralston, 2011). Dado que en un estuario el principal agente que promueve la estratificación de la columna de agua es la fuerza de boyancia (inducida por la descarga de aguas continentales) y la mezcla es principalmente inducida por la marea, es común analizar la competencia de estos dos forzamientos para determinar el tipo de estuario (Figura 2). Por ejemplo, para la formación

de estuarios fuertemente estratificados, la condición necesaria es que la tasa de entrada de agua dulce exceda la tasa de mezcla, la cual es normalmente inducida por la marea (Geyer y Ralston, 2011).

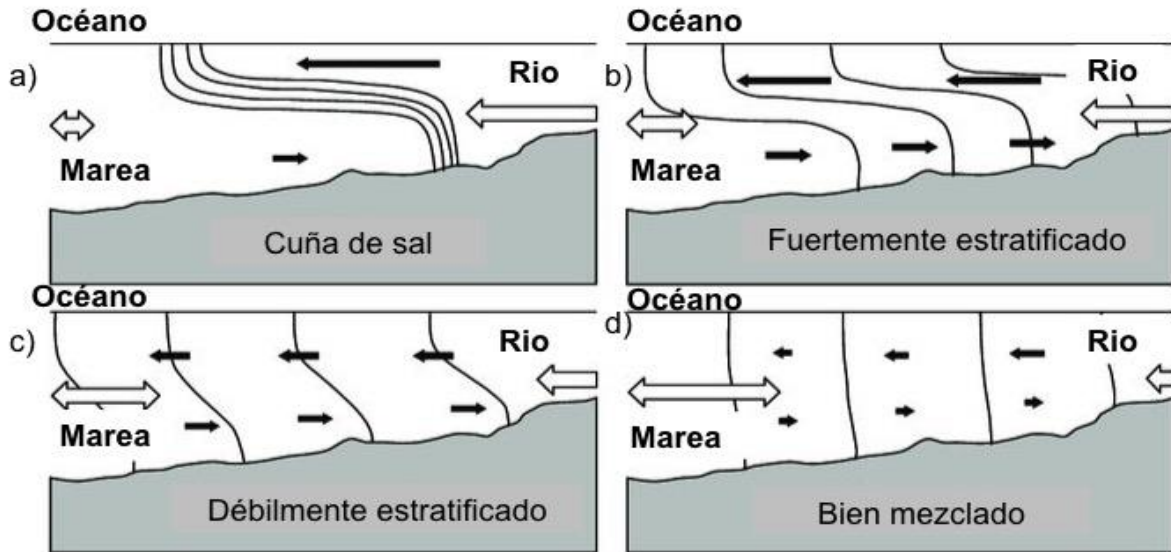


Figura 2 Clasificación de estuarios con base a su estructura vertical de salinidad a) Cuña de sal, b) Fuertemente estratificado, c) Débilmente estratificado y d) Bien mezclado (Cameron y Pritchard, 1963).

Estuarios de cuña de sal

Los estuarios de cuña de sal son comunes, mas no exclusivos, de la parte baja de los ríos que desembocan directamente a la plataforma continental donde la marea es micromareal (Geyer y Ralston, 2011). Las características físicas de la cuña de sal son función principalmente del gasto del río (Q) y en segundo término de la fuerza de marea, o el esfuerzo del viento (D'Adams *et al.*, 1985). La presencia/ausencia de la cuña de sal está supeditada a un gasto crítico (Q_c), el cual es, por lo general, el promedio histórico de Q . Bajo condiciones de $Q > Q_c$ la cuña de sal es erosionada/expulsada del río. Mientras que para condiciones de $Q < Q_c$, se da la intrusión salina formando una cuña, la cual suele permanecer estacionada o "arrestada" bajo condiciones de Q constante (Ibáñez *et al.*, 2009), y solo se mueve río arriba y río abajo con la marea (p. ej. excursión por marea) (Hume *et al.*, 2007).

Perfiles típicos, observados en la naturaleza, del promedio temporal de la velocidad (velocidad submareal o residual) y de la salinidad en un estuario de cuña salina, exhiben una estructura vertical, es decir, las isotacas y las isohalinas son horizontales (Figura 3). El perfil de velocidad residual muestra una capa superficial con flujo neto hacia el océano, y una capa de fondo con flujo neto hacia río arriba. En tanto que el perfil de salinidad muestra dos capas de agua separadas por una fuerte haloclina. La capa superficial es ocupada por agua de baja salinidad, mientras la capa de fondo es ocupada por agua marina (Ibáñez et al., 2009).

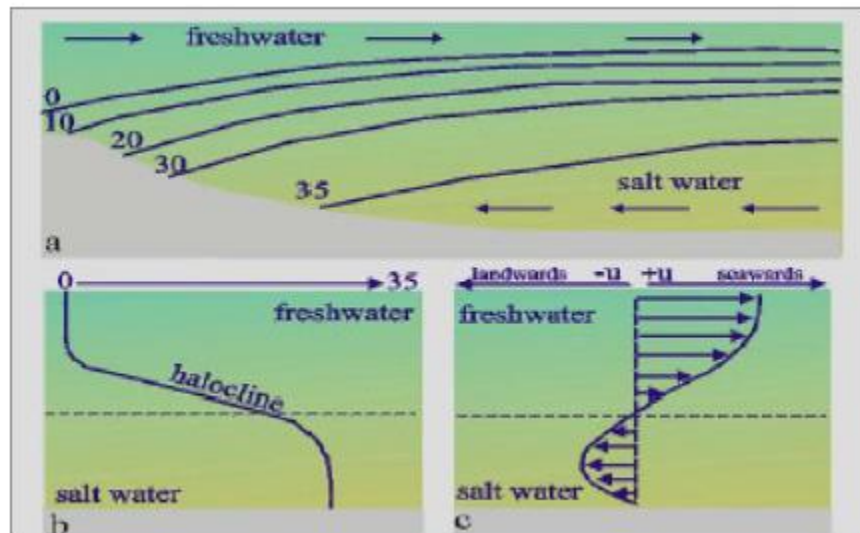


Figura 3 Estuario de cuña salina, a) comportamiento de las isohalinas en relación con la cercanía de la boca y la profundidad b) haloclina y c) circulación general (Ibáñez et al., 2009).

De acuerdo a la teoría, en un estuario idealizado, recto y con fondo plano, la posición vertical de la interface de una cuña salada arrestada es descrita por (Geyer y Ralston, 2011):

$$\frac{\delta h_i}{\delta x} = C_i \frac{F_1^2}{1-F_1^2} \frac{h_0}{h_2} \quad (1)$$

donde $h_0 = h_1 + h_2$ es la suma del espesor de la capa de mezcla superficial y la capa mezclada del fondo, C_i es el coeficiente de fricción entre las capa superficial y de fondo, y F_1 es el número de Froude de la capa superficial, es decir:

$$F_1^2 = \frac{Q_1^2}{g' B^2 h_1^3} \quad (2)$$

donde Q_1 el volumen de agua transportado en la capa superficial, B es el ancho del canal, y g' es la gravedad reducida (Geyer y Ralston, 2011).

Sin embargo, datos observacionales han demostrado que la geomorfología del estuario (cambios batimétricos, las curvaturas o meandros del río, los cambios del ancho del canal, la heterogeneidad de la rugosidad del lecho del río) modula en gran medida la posición y avance de la cuña de sal, a tal grado que el modelo idealizado arriba descrito no explica la posición de la cuña de sal. Por ejemplo, Haralambidou *et al.*, (2010), exhiben la influencia de los cambios batimétricos en el avance de la cuña de sal en el estuario Strymon ubicado al norte de Grecia donde se encontró que la longitud y el espesor de la cuña está directamente relacionado con la cantidad de descarga del río, la presencia de asimetría en el fondo marino y que la disminución de la descarga del río produce cambios en el flujo y reflujos del agua marina en la cuña salina, y en las zonas angostas y bajas disminuye la entrada del agua salina efecto que produce condiciones de hipoxia en el medio y aumento de turbidez en el fondo del estuario. Otro ejemplo de la modulación de la geomorfología en la posición de la cuña de sal fue reportado por Magdaleno (2011), quien a partir de datos observacionales tomados en el río Ebro, exhibe el papel que juega los cambios bruscos de la batimetría a lo largo del eje axial del estuario en el retroceso de la cuña de sal, la cual detiene su avance hacia el mar ante la presencia de bajos, quedando estacionada hasta que la descarga del río aumente y la desplace hacia fuera del estuario. Un ejemplo más fue reportado por Payares *et al* (2018), quienes estudiaron la hidrodinámica en el estuario de Bahía Blanca, Argentina, en el cual analizan las características morfológicas y la importancia de la hidrodinámica al controlar la cantidad del curso del flujo que atraviesa. Los resultados indican que existe una relación marcada entre la dirección, la velocidad de las corrientes de marea (flujo y reflujos) y la geomorfología del área, ya que en el tramo meandriforme, las corrientes de flujo y reflujos interactúan en función de la batimetría del canal, los vórtices de ángulo causan corrientes en direcciones preferenciales en la marea saliente, este efecto también es debido a la presencia de un banco alargado el cual crea una barrera de reflujos por lo que el agua cambia su dirección opuesto a la del meandro.

Algunos estudios han demostrado que la longitud de la cuña de sal y la posición de la haloclina en los estuarios, guardan una relación directa (no lineal) con la descarga del río (Haralambidou *et al.*, 2010, Krvavica *et al.*, 2021), relación que es exclusiva del estuario estudiado. Como es el caso del estuario del río Neretva en Croacia (Krvavica *et al.*, 2021) y en el estuario del río Strymon en Grecia (Zachopoulos *et al.*, 2020), y el río Jamapa en el suroeste del Golfo de México (Sanay y Perales, 2022).

2. Antecedentes

Energía por gradiente salino

La energía de gradiente salino tiene su aparición y fundamento de la teoría de Pattle (1954), donde se expone que al entrar en contacto dos cuerpos de agua con distintas cantidades de sal, se crea una liberación de energía, sin embargo, este principio no se había estudiado con detalle hasta finales del pasado milenio, con el desarrollo de las energías renovables, donde se empezaron a buscar opciones para crear energías limpias. En cuanto a las técnicas para poder aprovechar la EGS, dos han sido las más conocidas y en la que se han estado trabajando por más tiempo, la primera es la osmosis a presión retardada y la segunda es la electrodiálisis inversa.

En 1975, Sydney Loeb, propone el método llamado Ósmosis a Presión Retardada, como un procedimiento para poder aprovechar la energía producida por la unión de masas de agua con diferentes salinidades, obteniendo resultados de entre 1.56 a 3.27 Wm⁻² (experimento realizado con soluciones de Salmuera), los resultados obtenidos fueron muy por debajo de lo esperado (Loeb, 1975). Weinstein y Leitz, en 1976, idearon un método alternativo, llamada electrodiálisis inversa, basado en los modelos de una batería de sal, esto es el intercambio selectivo entre aniones y cationes para generar energía (Weinstein y Leitz, 1976). En el 2009, se puso en marcha la primera planta piloto de generación de electricidad a través del gradiente salino, utilizando el procedimiento de osmosis por presión retardada, con el objetivo de producir 1 MW de energía eléctrica utilizando 200.000 m² de membrana (Altaee y Sharif, 2015; Touati *et al.*, 2017), sin embargo, no se concretó la viabilidad

energética del prototipo, debido al elevado costo, y a la eficiencia de las membranas (Al-Qaraghuli y Kazmerski, 2012).

EGS en estuarios

Entre los estudios encaminados a encontrar el lugar idóneo, donde se pueda aprovechar este tipo de energía, se encuentra el de Álvarez y colaboradores (2014), quienes realizaron un análisis del potencial energético de una central hipotética en el río Magdalena, Colombia, buscando un lugar idóneo para la localización de la central de generación de energía a través del gradiente salino, tomando en cuenta la estructura salina y su variabilidad en la boca del río, la cual dependió de las características de estratificación del estuario, la descarga media del río, la profundidad y el rango mareal (<1.1 m), en este estudio se recalca la importancia de la marea como principal fuerza motriz restrictiva para la generación de energía a partir del gradiente salino.

Estudios actuales buscan encontrar el mejor sitio para la obtención de la energía de gradiente salino y la creación de membranas más eficientes, como los realizados por Hydro-Quebec (2015), donde se busca la mejora de las membranas utilizadas en el prototipo de ósmosis a presión retardada, aplicando tecnología innovadora para la disminución de la cantidad de agua utilizable en la generación de energía.

También se encuentran proyectos alternos como el realizado por ReaPower, el cual plantea como zona idónea para la extracción de los gradientes de salinidad, utilizar sistemas naturales saturados utilizando agua del océano y agua salobre en lugar de agua dulce, con fin de obtener mayor cantidad de energía, esto aunado a que también están buscando desarrollar nuevas membranas de intercambio iónico (Tedesco *et al.*, 2016)

Río Jamapa como estuario de cuña de sal

De acuerdo con Perales-Valdivia *et al.*, (2018) la parte baja del río Jamapa, Veracruz, se comporta como es estuario micromareal fuertemente estratificado o de cuña de sal. Las características físicas de la cuña son dictadas principalmente por la descarga fluvial y en menor medida por la marea y el efecto local y remoto del viento. Estos resultados fueron

producto del análisis de datos de tres campañas de muestreo de 24hr cada una, las cuales ocurrieron bajo diferentes condiciones de descarga de agua fluvial, y esfuerzo del viento. Bajo condiciones de no viento y baja descarga de aguas fluviales (Q menor que el gasto promedio histórico), donde la intrusión salina se hizo presente y se observó el vaivén inducido por la marea. Bajo condiciones de no viento, y alta descarga de aguas fluviales (magnitud de Q similar al gasto histórico promedio), la intrusión salina se observó únicamente durante la fase de llenante, mientras que durante la vaciante, la parte baja del río Jamapa estuvo ocupada solo de agua dulce. Bajo condiciones de baja descarga fluvial y efecto remoto del viento, la intrusión salina se hizo presente, pero su desplazamiento a lo largo del estuario no se correlacionó con la marea, es decir, el efecto de la marea en el desplazamiento de cuña fue enmascarado por el efecto remoto del viento.

Perales-Valdivia y colaboradores (2018) sugirieron que el gasto crítico para la presencia/ausencia de la intrusión salina, era cercano al gasto histórico promedio, como ha sido evidenciado en otros estuarios micromareales (Ebro, Magdalena, Sinú). Sin embargo, el diseño de muestreo no permitió demostrar tal hecho. Sanay y Perales (2022), basado en datos hidrográficos colectados mensualmente (durante 2015) a lo largo del estuario, encuentran que la longitud de la cuña de sal (L_{15}) y la profundidad de la haloclina (H_{15}) en la boca del estuario, guardan una relación cuadrática con el promedio diario de la descarga del río Jamapa. Los muestreos tomaron lugar bajo diferentes condiciones de descargas fluviales, de condiciones de viento y en diferentes fases de la marea. De acuerdo a los autores, la cuña de sal estuvo presente en todos los muestreos, donde el gasto del río Jamapa, (durante el año de muestreo enero 2015- febrero 2016) osciló entre $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $68 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. En algunos muestreos de invierno, se observó la acción del oleaje y viento en la mezcla de la columna de agua, los cuales afectaron únicamente a las estaciones cercanas a la boca del estuario, mientras que la condición de cuña salina se mantuvo al interior del estuario. Adicionalmente, de acuerdo a Sanay y Perales (2022), a pesar de que los ajuste de L_{25} y H_{25} con el promedio diario de la descarga del río Jamapa, mostraron una alta correlación ($R^2 > 0.88$), se observaron importantes discrepancias (Figura 4 en Sanay y Perales, 2022), y sugirieron que estas pudiesen deberse a la geomorfología del canal del río en la dinámica de la cuña de sal, o efectos locales y remotos del viento, situaciones que no se pudieron resolver dado el diseño del muestreo.

3. Pregunta de Investigación

¿Cuál es potencial energético del estuario de cuña salina ubicado en el río de Jamapa, Veracruz y como varía este a lo largo del año?

4. Hipótesis

El estuario del río Jamapa presenta condiciones de fuerte estratificación salina (estuario de cuña salina), las cuales son idóneas para la obtención de energía mediante el método del gradiente salino, estas condiciones varían a lo largo del año debido a la variación temporal de los forzamiento externos (descarga del río, mareas y viento) que afectan su dinámica, por lo que se espera que durante las temporadas de baja descarga fluvial y de Nortes se encuentren condiciones con mayor potencial energético.

5. Objetivo

5.1 Objetivo General

Determinar el potencial energético del estuario río Jamapa, así como su variación temporal.

5.2 Objetivos específicos

- i) Exhibir las características de la cuña sal en el río Jamapa, así como su temporalidad.
- ii) Determinar la variación temporal y el efecto de los forzamiento externos en la presencia de la intrusión salina en cuatro puntos predeterminados ubicados a lo largo del estuario.
- iii) Determinar el potencial energético por gradiente salino y su variación temporal, en los cuatro puntos predeterminados.

6. Justificación

En la actualidad se busca una forma eficaz de producir energía, de una manera perdurable, sin emisiones de contaminantes y donde se obtengan más beneficios que perjuicios.

Una alternativa para cubrir la demanda energética que exige la sociedad actual y disminuir las emisiones de CO₂, es el uso de las energías renovables (ER). Sin embargo, a la fecha, no hay ninguna fuente de energía renovable (ni la suma de ellas) que pueda cubrir la demanda energética mundial, por lo que es altamente deseable continuar con la investigación para su rentabilidad, maximizar su uso y eficiencia. Aunado a esto, el potencial energético de estas ER varía en el espacio y en el tiempo. Por su naturaleza, el litoral del estado de Veracruz ha sido identificado como posible fuente de energías limpias por gradiente salino. En un primer esfuerzo para evaluar su posible vocación en generación energética sin emisiones de CO₂, en este estudio se presenta la primera estimación del potencial energético por gradiente salino evaluado en el estuario de desembocadura de río Jamapa, Veracruz. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan a elucidar si EGS en estas costas es realmente una alternativa óptima para la demanda energética para el Golfo de México, así como se busca contribuir al conocimiento de las energías renovables para futuros trabajos.

7. Área de Estudio

El río Jamapa desemboca en la parte suroeste del Golfo de México (19°06'05" N y 96° 06'03" O), junto a la ciudad de Boca del Río, Veracruz. (Figura 4). El río tiene su origen en la sierra madre oriental, comenzando en el Pico de Orizaba, fluyendo hacia la zona baja en la parte central de estado de Veracruz, tiene una longitud aproximada de 360 km, y una cuenca hidrográfica de 3,658 km². Las características topográficas de la cuenca hidrográfica propician que las aguas pluviales se concentren en dos corrientes principales en poco tiempo: El río Cotaxtla y el río Jamapa (Pereyra *et al.*, 2010). Ambas avenidas convergen a 10.65 km antes de desembocar al mar como río Jamapa. Considerando como la parte estuarina del cauce del río, donde se ha detectado la máxima intrusión salina, se puede decir que la longitud

del estuario del río Jamapa es de 10 km (Perales *et al.*, 2018). Esta parte del caudal tiene, en promedio, 80 m de ancho y 3 m de profundidad. La bocana del río está protegida con dos espigones, que buscan mantener la libre comunicación con el mar.

Esta zona geográfica posee condiciones climáticas bien marcadas, con temporadas de secas y lluvias, que son de noviembre a mayo, y de junio a octubre respectivamente. Las precipitaciones se deben al arribo de masas de aire tropical húmedo (ondas tropicales) y masas de aire cálido provenientes del este (vientos alisios), los que interactúan en las zonas montañosas de la Sierra Madre Oriental produciendo lluvias abundantes (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).

El promedio mensual de descarga del río oscila entre $< 20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en época de secas y $> 60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en temporada de lluvias. Dado que el río Jamapa es de respuesta rápida y dado que no está represado, el promedio diario de la descarga fluvial exhibe fuertes variaciones, como consecuencia de forzamientos a corto plazo (del orden de días) como los frentes fríos, las tormentas tropicales o los huracanes (Pereyra *et al.*, 2017). El rango histórico del promedio diario mensual es de $< 20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en secas y $> 90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en temporada de lluvias.

En cuanto al esfuerzo del viento, se observa que entre los meses de noviembre a abril, arriban al Golfo de México sistemas frontales, produciendo eventos de vientos fuertes localmente llamados “Nortes”, los cuales tienen una duración de 2 a 5 días y velocidades mayores a los 15 ms^{-1} , los cuales ocasionalmente vienen acompañados de fuertes lluvias (Romero-Centeno *et al.*, 2021). Estudios de modelación numérica muestran que los vientos juegan un papel importante dentro de la plataforma continental del Golfo de México, en particular en el estado de Veracruz la circulación media es hacia el sur entre septiembre y marzo, y hacia el norte de mayo a agosto, abril es considerado como un mes de transición donde se pueden observar ambas direcciones en los vientos (Zavala-Hidalgo, *et al.*, 2003), Allende-Arandía y colaboradores (2016) encontraron que las variaciones dentro de la plataforma continental en Veracruz, (tanto de magnitud y dirección) produce vientos más intensos (con un pico máximo entre 2 y 10 días) de otoño a invierno y débiles en el verano.

La marea en área del río Jamapa es mixta con dominancia diurna, posee un rango micro-mareal < 2.0 m, donde los armónicos dominantes son K_1 , O_1 y M_2 . (Salas-Pérez *et al.*, 2008).

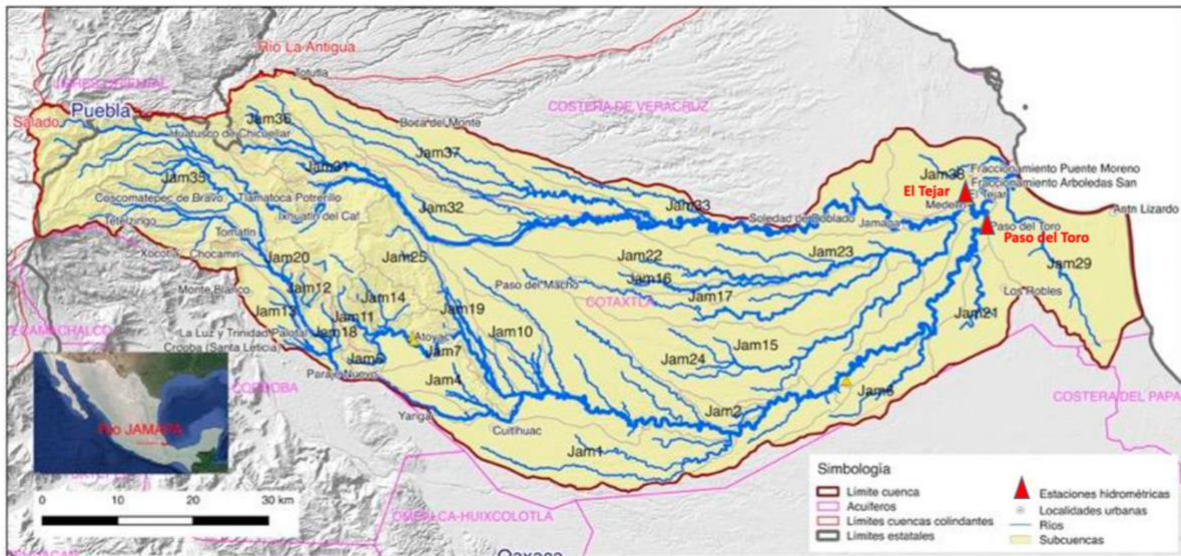


Figura 4 Localización e hidrografía de la cuenca del río Jamapa, y localización de estaciones hidrológicas. (INECC, 2017)

8. Datos.

Para comprobar la hipótesis y alcanzar los objetivos arriba planteados, se obtuvieron datos de forzamientos externos: meteorológicos, de descarga

de río y de marea, así como datos hidrográficos históricos del estuario río Jamapa. Adicionalmente, se colocaron anclajes en puntos estratégicos para medir los campos de temperatura y salinidad con alta resolución temporal, esto a lo largo del año 2019. A continuación, se detallan las fuentes de datos y las campañas de muestreo realizadas para este fin.

8.1 Datos Hidrológicos y Meteorológicos

Los datos de gasto de los ríos Cotaxtla y Jamapa (tributarios del río Jamapa) fueron obtenidos de la base de datos BANDAS de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para las estaciones hidrométricas de *Paso del Toro* (ubicada en la avenida del río Cotaxtla) y *el Tejar* (ubicada en la avenida del río Jamapa). Los datos obtenidos son de gasto diario, registrado en ambas estaciones hidrométricas, se tiene datos para el periodo de 1952-2019.

Los datos de magnitud y dirección del viento fueron obtenidos de la estación meteorológica del Instituto de Ciencias del Marinas y Pesquerías UV ($19^{\circ}06'00.80''$ N, $96^{\circ}06'31.70''$ O). La marca y modelo de la estación meteorológica utilizada es Davis Vantage Pro-2, y cuenta con una resolución temporal de 10 minutos. El periodo de datos utilizados en este trabajo abarca de diciembre 2018 a enero 2020.

8.2 Datos hidrográficos

Se obtuvieron datos históricos de los campos de temperatura y salinidad de la parte estuarina del río Jamapa, obtenidos a partir de la base de datos del proyecto “Monitoreo Hidrológico y de Corrientes de Veracruz” (MOHICOVER, que pertenece al CA-OCEANOGRAFÍA de la UV) para el periodo de 2015 a 2019. Estos datos fueron obtenidos con un CTD marca Cast-Away. Esta base de datos es construida a partir de un monitoreo mensual, donde se realizan lances hidrométricos en estaciones predeterminadas, ubicadas a lo largo del estuario y espaciadas 400 m aproximadamente (Figura 5). En cada campaña, la primera estación visitada es C1 (Figura 5), mientras que la última estación visitada debe reflejar la ausencia de la intrusión salina, por lo que el número total de estaciones visitadas en cada campaña varía en función de la longitud de la cuña de sal. En la Tabla I se resume el número de campañas realizadas por cada mes en el periodo 2015-2019. Nótese que algunos años de muestreo tiene vacíos de información en ciertos meses.

Tabla I. Fecha de las salidas del MOHICOVER (mes, año) y número de salidas del periodo 2015-2019.

Mes	Año	Número de salidas por mes, para cada año
Enero	2015, 2016, 2017, 2018	1, 1, 1, 1.
Febrero	2016, 2017	1, 1.
Marzo	2015, 2017	1, 1.
Abril	2015, 2016	2, 2.
Mayo	2015, 2016, 2017, 2019	1, 1, 1, 1.
Junio	2015, 2016, 2017, 2018, 2019	1, 1, 2, 1, 1.
Julio	2015, 2016, 2017, 2018, 2019	1, 1, 1, 1, 1.
Agosto	2015, 2016, 2017, 2018, 2019	1, 1, 1, 2, 1.
Septiembre	2015, 2017, 2018, 2019	1, 1, 1, 1.
Octubre	2015, 2016, 2017, 2018, 2019	1, 1, 1, 1, 1.
Noviembre	2015, 2016, 2017, 2018, 2019	1, 1, 1, 1, 2.
Diciembre	2015, 2016, 2017, 2019.	1, 1, 1, 1.

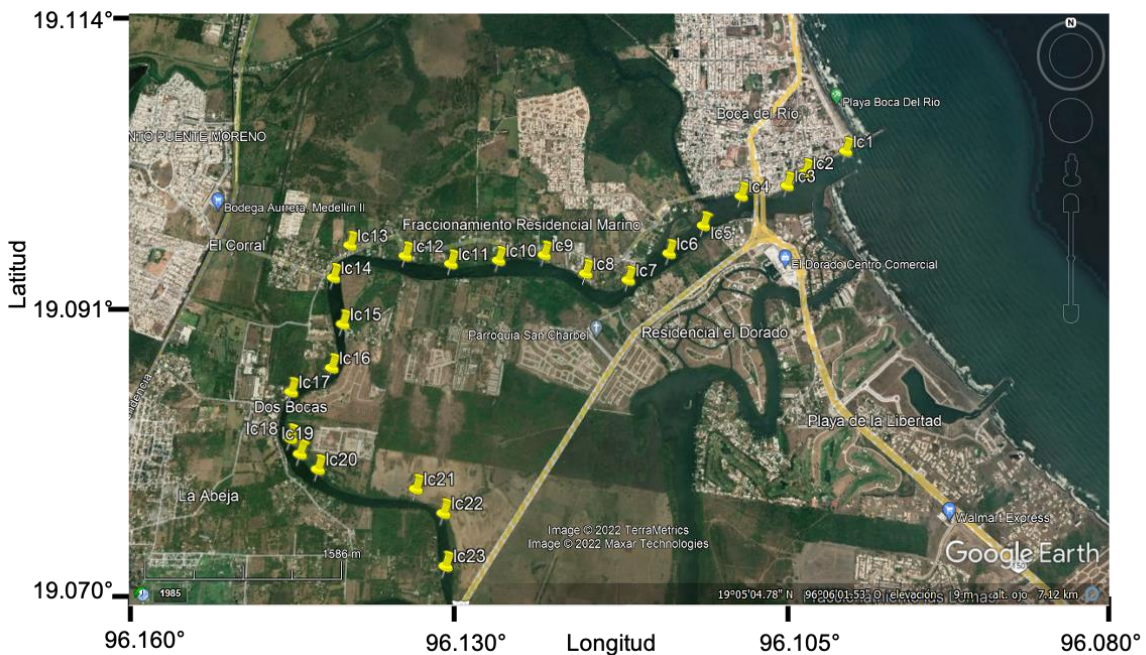


Figura 5 Localización de los sitios donde se realizaron los lances de CTD del proyecto MOHICOVER a lo largo del río Jamapa.

Para determinar el potencial de gradiente salino en el estuario del río Jamapa, es necesario contar con mediciones de alta resolución temporal de los campos de temperatura y salinidad a lo largo de la cuña. La resolución temporal debe ser tal que se puedan resolver las variaciones inter e intra mareales, así como las estacionales. Para tal fin y con base en el análisis los datos hidrográficos históricos, se seleccionaron cuatro sitios estratégicos a lo largo del estuario (Figura 6), donde se colocaron anclajes para medir cada 10 minutos la temperatura (T) y salinidad (S) del agua en la capa de fondo.

Cada anclaje fue equipado con un CTD marca Diver Van Essen, los cuales fueron programados para obtener un dato cada 10 minutos, durante el periodo de diciembre 2018 a Enero 2020. Los CTDs fueron recuperados (y reinstalados) periódicamente para respaldar datos y dar mantenimiento. La posición de los anclajes y la profundidad a la que se colocaron, se indica en la figura 6 y la tabla II. Nótese que todos los anclajes fueron ubicados a lo largo de los primeros 5 km medidos desde de la desembocadura.

Tabla II. Localización y profundidad de los anclajes.

Estación	Latitud	longitud	Profundidad
ANCI	19° 5'57.12" N	96°6'21.95" O	3.50 m
ANC2	19° 5'50.64" N	96 °6'35.99" O	3.18 m
ANC3	19° 5'39.76" N	96°7'22.07" O	4.00 m
ANC4	19°5'37.68" N	96°8'28.68" O	3.80 m



Figura 6. Localización de los sitios donde fueron instalados los anclajes (CTD DIVER) a lo largo del río Jamapa.

9. Metodología y Resultados

9.1 Diagrama de flujo de la metodología



9.2 Análisis de la Descarga del Río

La descarga del río es uno de los principales forzamientos que afecta la dinámica de la cuña salina, y por ende afecta también a la cantidad de energía por gradiente salino que puede ser extraída del mismo. Por lo que es importante conocer el comportamiento de la descarga del río Jamapa. Para tal fin, se utilizaron las series de tiempo del promedio diario de las descargas (Q) registradas en las estaciones “Paso del Toro” y “El Tejar” para el periodo de 1952 – 2019 (Tabla III). Cabe mencionar, que para ambas estaciones también se registra la escala (tirante) del río con la misma resolución temporal. Las series de tiempo de ambos ríos cuentan con espacios don falta de información. Donde en algunos casos solo la falta la variable Q, pero otros muestran la ausencia tanto de Q como de la escala.

Para completar las series de tiempo del gasto de ambos ríos, se procedió de la siguiente manera: para los periodos donde solo se cuenta con la escala (p.ej. diferentes espacios observados entre los años 2001 y 2012), las series de Q fueron completadas utilizando las ecuaciones 3 y 4. Dichas ecuaciones son el producto del ajuste entre Q y la escala histórica (1952-2019) para cada río, como se muestra en la figura 7. La ecuación 3 corresponde a la estación hidrométrica Paso del Toro, mientras que la ecuación 4 corresponde a la estación el Tejar. Cabe mencionar que para la estación de Paso del Toro el R^2 fue de 0.9736, y para la estación del Tejar, $R^2 = 0.986$.

$$y=7.7505x^2+50.425x-19.338 \quad (3)$$

$$y=10.871x^2 - 14.46x + 10.151 \quad (4)$$

Donde los valores de x (escala en m) y y (descarga en m^3s^{-1}) son específicos de cada avenida.

Para estimar el promedio diario del gasto de los ríos, donde no se cuenta con información de la escala, se utilizó la ecuación 5, la cual es el producto de la correlación entre las descargas históricas registradas en ambas estaciones hidrométricas (Paso del Toro y El Tejar). Dicha correlación exhibió un R^2 de 0.8362:

$$y=18.857x+1.4229 \quad (5)$$

Tabla III. Ubicación de las estaciones hidrométricas paso del Toro y el Tejar.

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud
Pasto del Toro	19° 11' 60" N	97° 0' 0" O	12 m
El Tejar	19° 12' 0" N	96° 12' 0" O	10 m

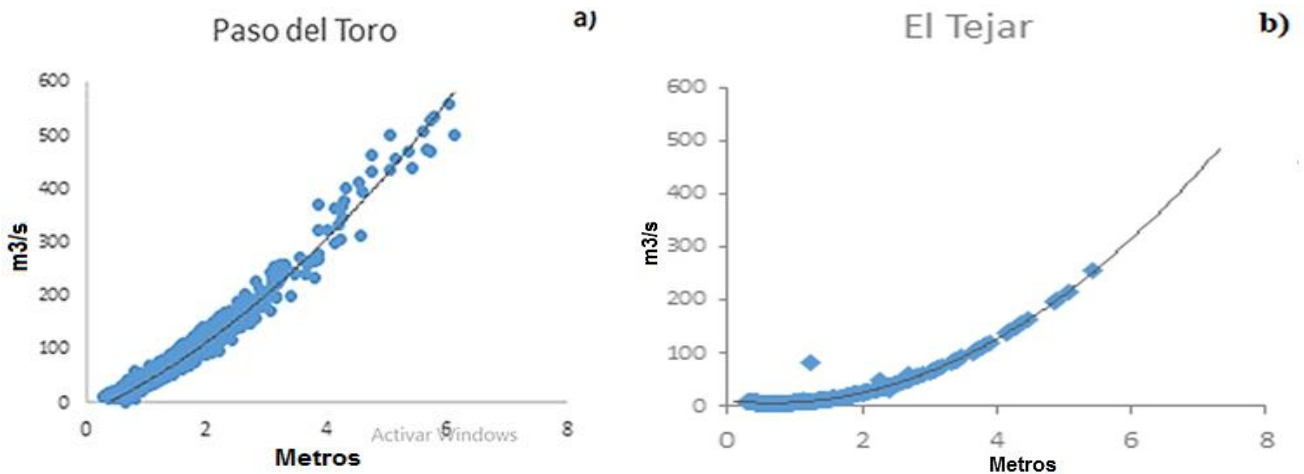


Figura 7. Correlación entre descarga del río y escala del río para las estaciones hidrográficas a) Paso del Toro, b) El Tejar.

En lo subsecuente en este manuscrito, todos los cálculos de las características de las descargas de agua continental son con base en las series de tiempo interpoladas y considerando la suma de ambos afluentes (Cotaxtla y Jamapa), referidos en lo posterior como río Jamapa.

El promedio histórico anual (considerando el periodo 1952 – 2019) de la descarga del río Jamapa es de $78.16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con promedio para la temporada de lluvias (meses de diciembre a mayo) de $92.51 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y promedio para el periodo de secas (meses abril a noviembre) de $17.57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Mientras que el promedio anual de Q considerando solo el año 2019, fue de $32.50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y los promedios de Q en lluvias y secas para el 2019 fueron de $48.93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $17.75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente.

La figura 8 muestra el promedio mensual histórico (1952 a 2019, línea azul) y el promedio mensual considerando solo el año 2019 (línea roja). El promedio mensual histórico (Q_h) exhibe un comportamiento bimodal bien definido, con una época de baja descarga de noviembre a mayo, y una época de alta descarga de junio a octubre. El rango del promedio mensual de Q es de $18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (observado en marzo) a $139 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (observado en septiembre). Nótese también el ligero descenso del valor de Q durante el mes de agosto, este asociado a la canícula.

El promedio mensual de la descarga del río Jamapa para el 2019 (Q_{19}), muestra un comportamiento bimodal similar con el promedio mensual histórico, donde las épocas de baja y alta escorrentía toman lugar en los meses marcados por el promedio histórico. Sin embargo, el gasto durante la época de alta descarga en este año, es menor de la mitad del histórico para los meses de junio a septiembre, resaltando que este año fue relativamente “seco”. Por ejemplo, los promedios Q_h y Q_{19} para el mes de junio, son $76 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Mientras que Q_{19} tiene valores similares a los observados en Q_h para los meses de octubre a mayo.

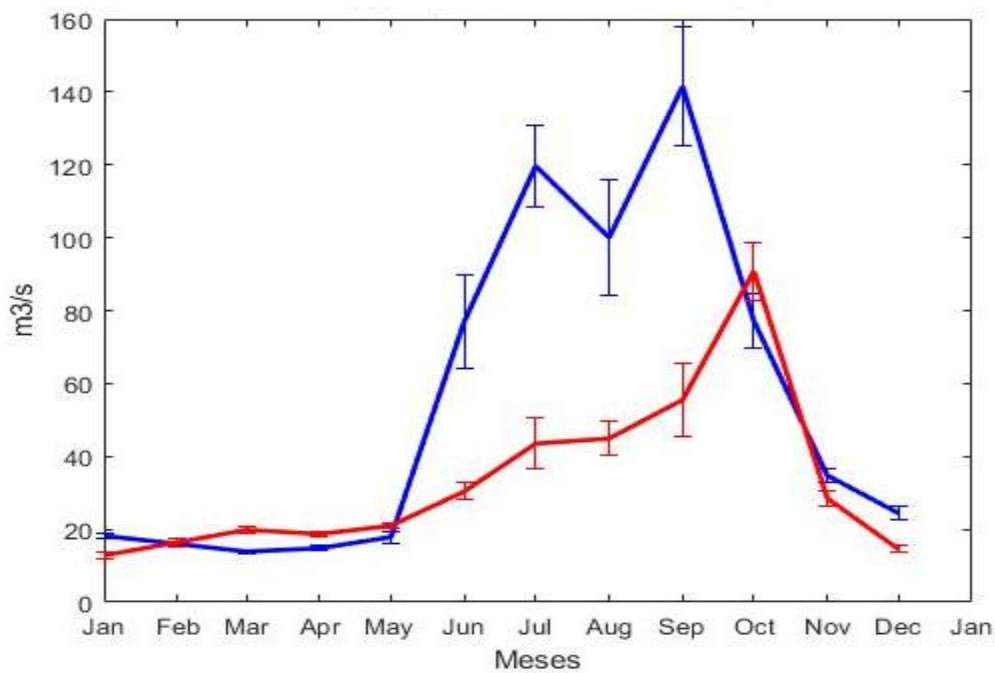


Figura 8. Descarga mensual promedio del río Jamapa para los años 1952-2019 (línea azul), con su error estándar y del año 2019 (línea roja) y su error estándar.

Para fines de generación de EGS es importante considerar el gasto del promedio diario (Q_d), sobre todo en aquellos ríos cuya escorrentía no está regulada por el humano, es decir, que no están represados, como es el caso del río Jamapa. La figura 9 exhibe Q_d

correspondiente para el periodo de diciembre 2018 a enero 2020. Durante los meses de baja descarga, el valor de Q_d se mantiene relativamente uniforme, variando entre $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. En contraste, durante la época de alta escorrentía se observan pulsos de Q con duración entre 5 a 15 días, que llegan hasta cuadruplicar el valor de la escorrentía en términos de 1-2 días. El rango Q_d observado en 2019 fue cercano a $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

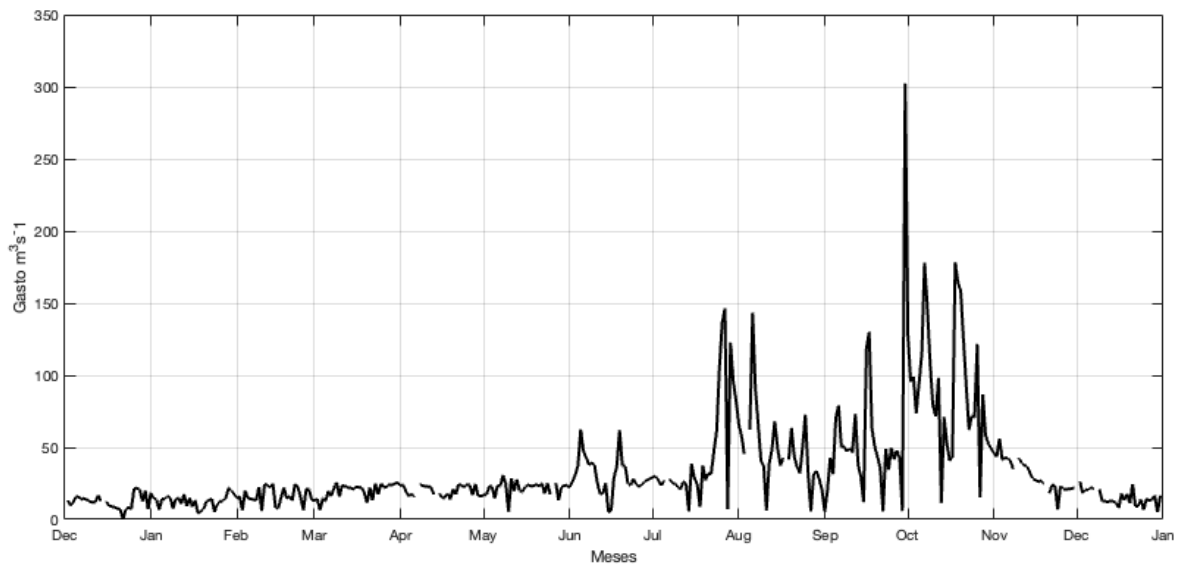


Figura 9. Promedio diario de la Descarga del río Jamapa para el año 2019.

9.3 Datos hidrográficos históricos en el estuario río Jamapa.

Para analizar la variación temporal de la intrusión del agua de mar al río Jamapa, se utilizaron perfiles de temperatura y salinidad de la base de datos MOHICOVER. Como se mencionó en la Sección 8, este monitoreo tiene una resolución temporal de un mes, y una resolución horizontal de $\sim 400 \text{ m}$ a lo largo del estuario. La resolución vertical es de 15 cm . En las

figuras 10 y 11 se muestran contornos de salinidad y temperatura en el espacio x-z, (distancia a lo largo del estuario – profundidad) para el año 2017. Como referencia, en estos gráficos se indica con círculos amarillos la posición de las estaciones hidrográficas visitadas en MOHICOVER en cada campaña de muestreo, y con las líneas rojas verticales, el sitio donde se colocaron los anclajes. Se seleccionó el año 2017 de esta serie de datos, ya que es el año más cercano al 2019 con el mayor número de muestreos en su serie (ver tabla I).

Perfiles Verticales de Salinidad

La figura 10 muestra la variación longitudinal (a lo largo del eje axial) y vertical del campo de salinidad para los meses de 2017. En general, los perfiles muestran la presencia de la cuña de sal en todos los meses, excepto para los meses de septiembre y octubre. La intrusión salina es mayor para los meses de bajas descargas, como enero, febrero, mayo, noviembre y diciembre, donde la máxima intrusión salina se registró durante el mes de febrero, alcanzando los 7 km de longitud. Para los meses de alta escorrentía, la cuña no sobrepasó los 4 km de longitud.

Para los meses de baja escorrentía, la diferencia de salinidad entre la capa superior e inferior es de por lo menos 25 unidades. Nótese que durante estos meses, la cuña de sal está presente en todas las estaciones donde se colocaron los anclajes. Sin embargo, es notable que la estación anc1 presenta una columna de agua menos estratificada en comparación con los anclajes anc2 - anc4, esto puede deberse a los efectos de mezcla inducidos por la acción del esfuerzo del viento y oleaje, los cuales son relativamente importantes en los meses de otoño-invierno.

A partir de los perfiles verticales de los lances del CTD a lo largo del río se graficaron los datos de temperatura y salinidad en los diferentes meses del año, con el fin de observar gráficamente el desplazamiento temporal de la cuña salina a lo largo del estuario del río Jamapa (Figuras 10).

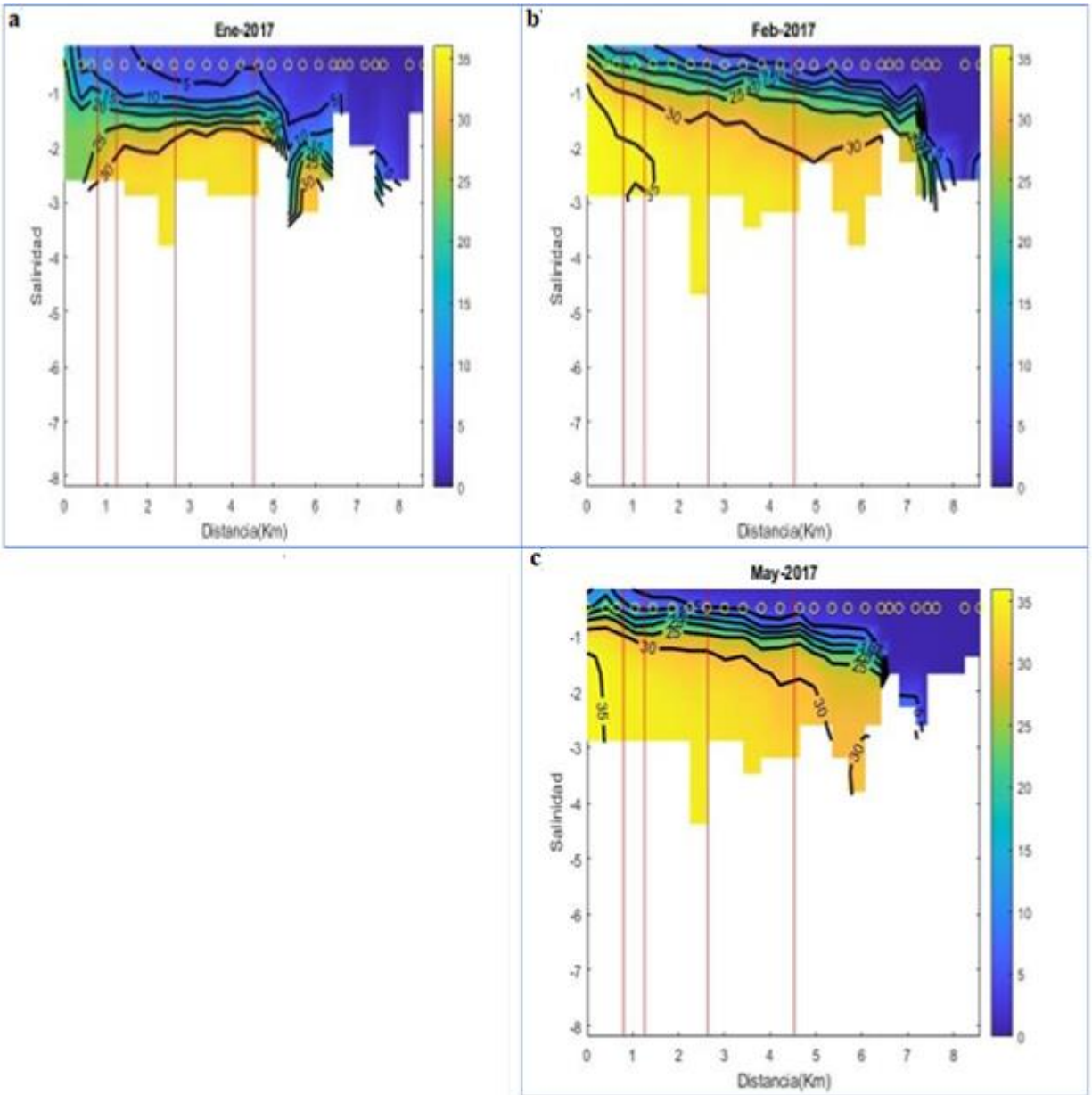


Figura 10. Perfiles verticales de salinidad de lances de CTD del MOHICOVER, para los meses de: a) enero, b) febrero y c) mayo. Los círculos amarillos corresponden a la estación donde se realizó el lance y las líneas rojas verticales muestran donde se localizan los cuatro anclajes.

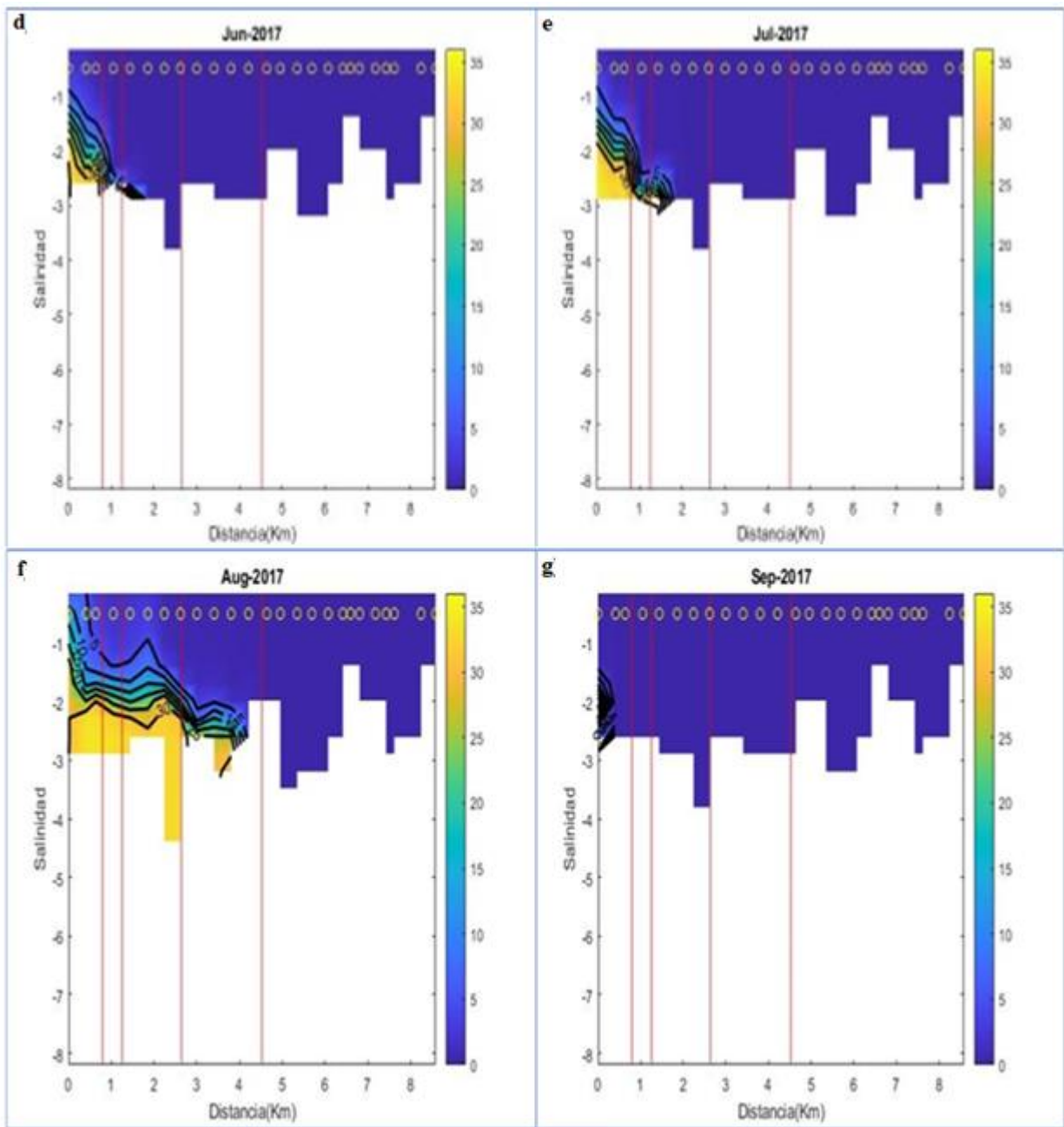


Figura 10, (Continua), solo que para los meses d) junio, e) julio, f) agosto, g) septiembre.

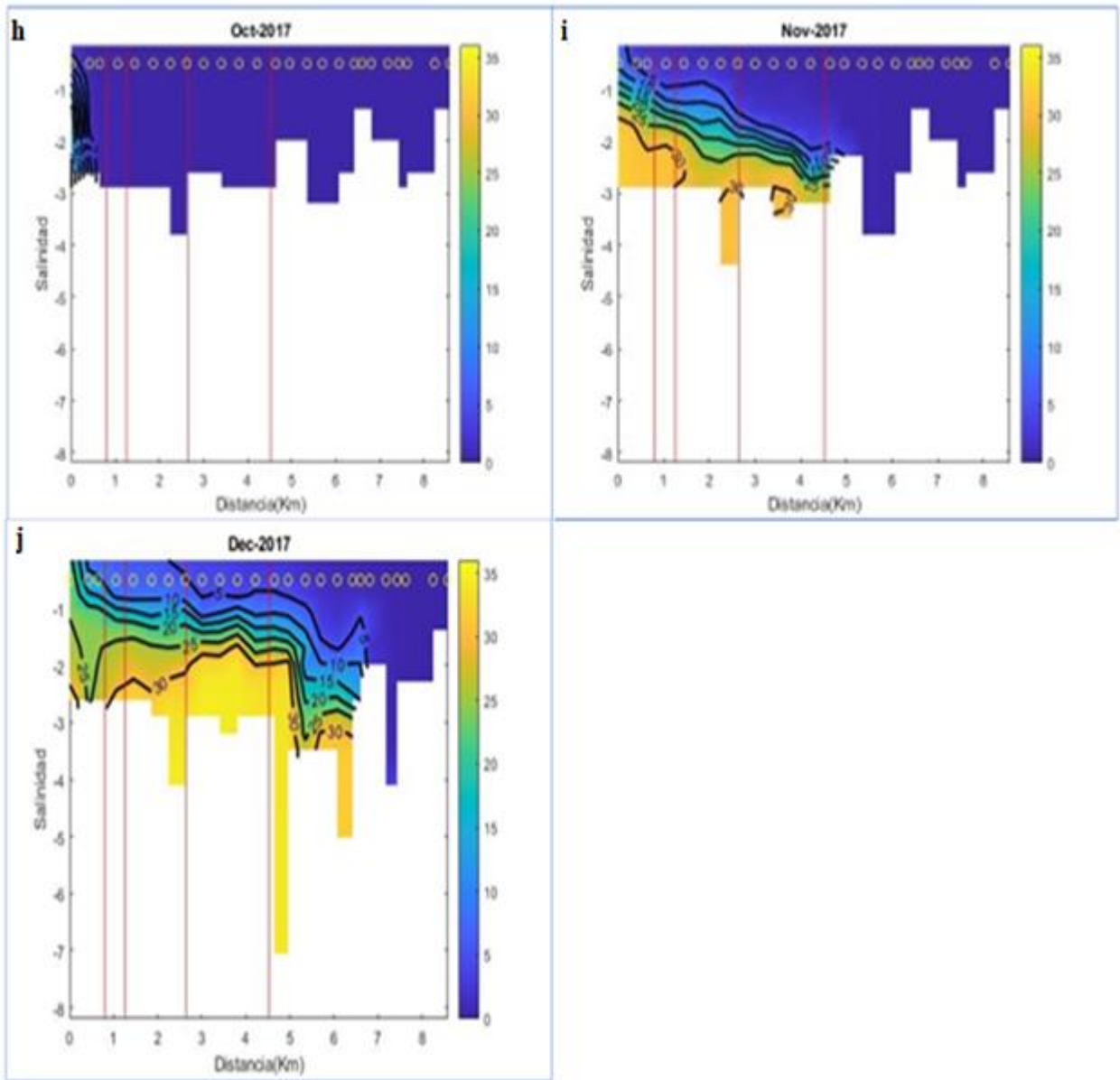


Figura 10, (Continua), solo que para los meses h) octubre, i) noviembre y j) diciembre

Perfiles verticales de Temperatura

La figura 11 muestra los cortes longitudinales del campo de temperatura para los diferentes meses con datos durante el 2017. Estos, se graficaron con el objetivo de observar las variaciones a lo largo del estuario debido a los cambios estacionales. En general, el campo de temperatura muestra diferencias entre la temporada de secas y la época de lluvias. Por ejemplo, durante la temporada de secas (Figuras 11a-11c y 11j), correspondiente a los meses de diciembre-mayo. Se observó que en los meses de enero y diciembre toda la masa de agua casi no presenta variación en temperatura, teniendo para diciembre un rango entre los 25 y los 26.6 °C, en enero presenta agua más fría con un rango menor entre los 21.6 y los 22.5 °C y de febrero a mayo se incrementa la temperatura de la superficie hacia el fondo llegando a valores por arriba de los 32 °C en mayo; es durante este mes donde se registraron las temperaturas máximas del año.

Las figuras 11d-11i, muestran las temperaturas obtenidas durante los meses de junio-noviembre (temporada de lluvias), las cuales se mantuvieron en un rango de 27 a 28 °C, excepto agosto, mostrando agua ligeramente más caliente, entre los 29.4 y los 31 °C, que es donde se presenta la canícula, el período caluroso y sin lluvias.

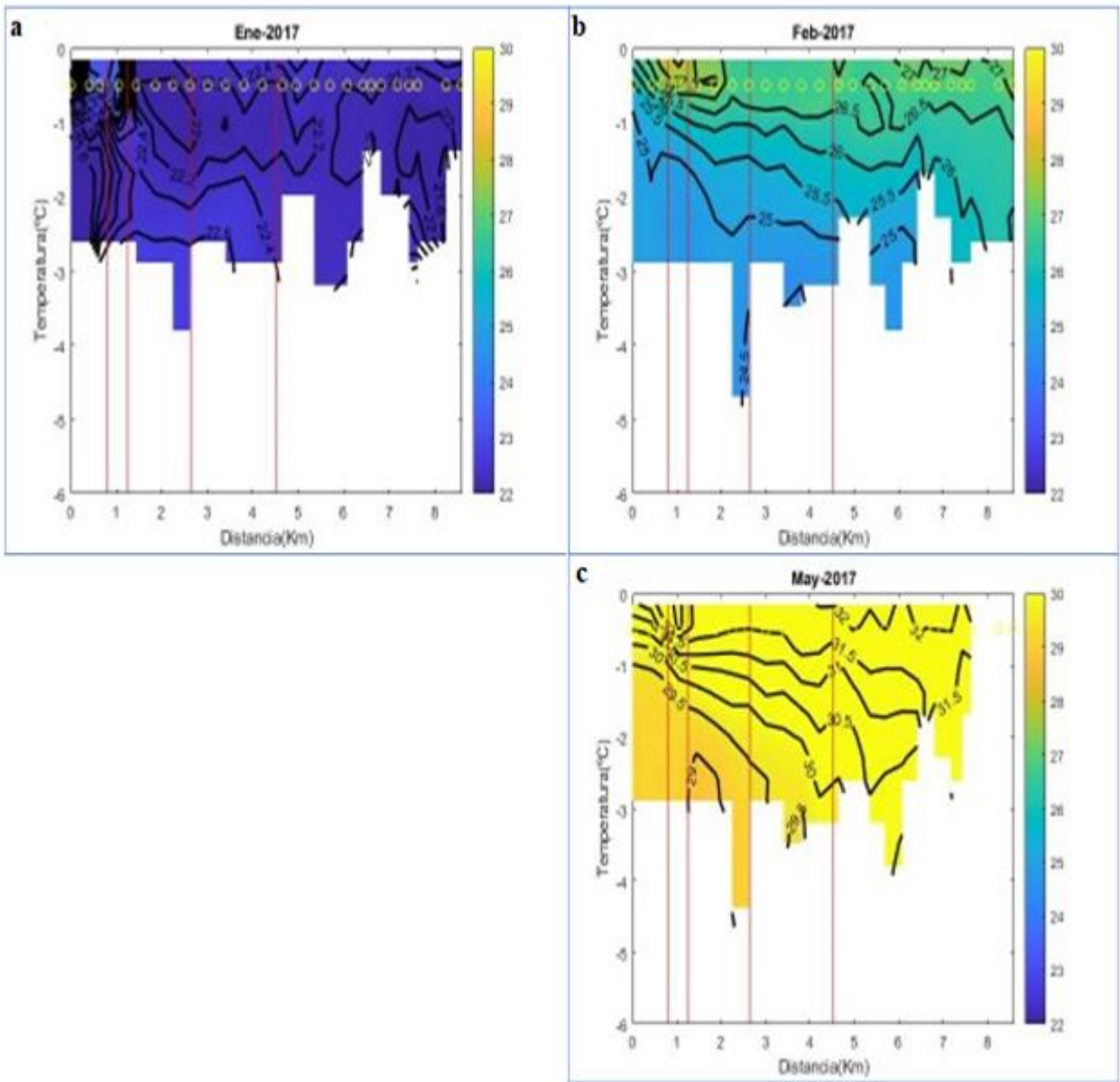


Figura 11. Perfiles verticales de temperatura de lances de CTD del MOHICOVER, para los meses de: a) enero, b) febrero y c) mayo. Las líneas rojas verticales muestran donde se localizan los cuatro anclajes.

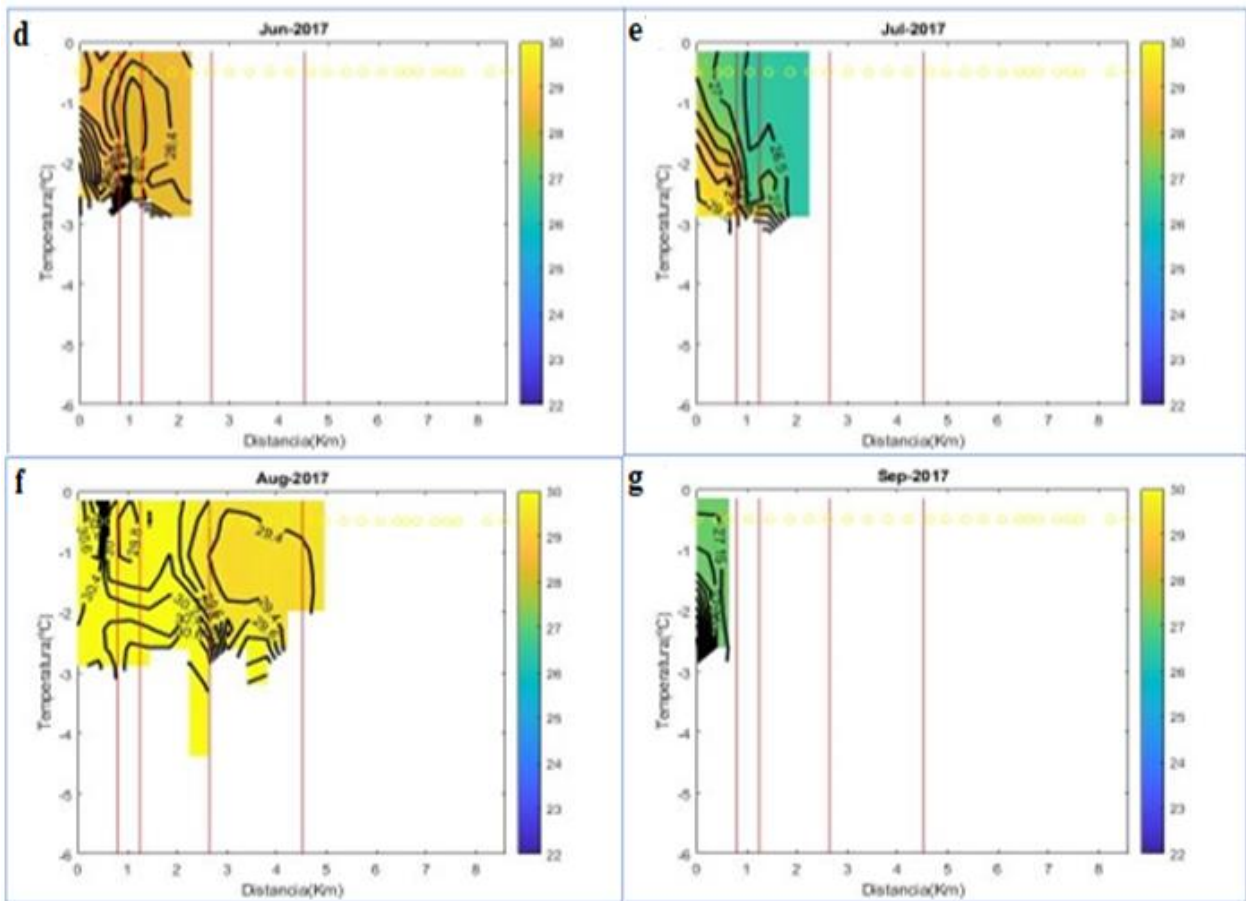


Figura 11. (Continua) Mapa de perfiles verticales de temperatura de lances de CTD del MOHICOVER, para los meses de: d) junio, e) julio, f) agosto y g) septiembre. Las líneas rojas verticales muestran donde se localizan los cuatro anclajes.

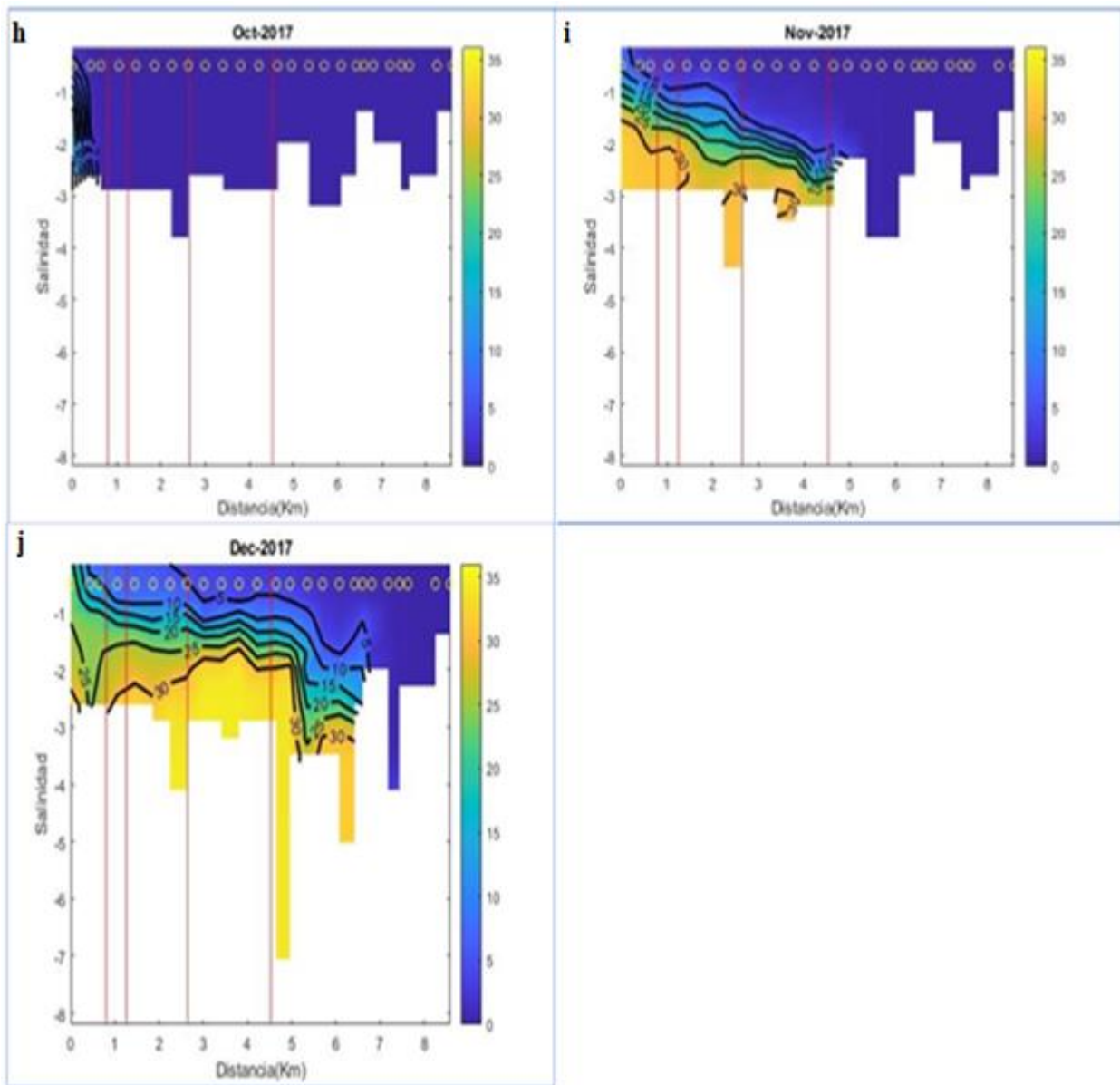


Figura 11. Mapa de perfiles verticales de salinidad de lances de CTD del MOHICOVER, para los meses de: h) octubre, i) noviembre y j) diciembre. Las líneas rojas verticales muestran donde se localizan los cuatro anclajes.

9.4 Serie Temporal de Temperatura y Salinidad Superficial

Dado que los anclajes solo proporcionaron datos de temperatura y salinidad del agua que ocupa la capa de fondo, fue necesario “generar” una serie de tiempo de salinidad de la capa superficial, la cual se presume está ocupada por agua con menor salinidad. La generación de dicha serie de tiempo se hizo utilizando los datos hidrográficos históricos del proyecto MOHICOVER para los años 2015-2019, a continuación se detalla el procedimiento.

Primero se seleccionaron los lances de aquellas estaciones de muestreo del proyecto MOHICOVER que coincidieran, o estuviesen más cercanas, a las posiciones de los cuatro anclajes. De los lances hidrográficos, solo se consideró las mediciones de temperatura y salinidad de la “capa superficial”, la cual fue definida en este trabajo, como los primeros 20 cm de la columna de agua a partir del espejo del agua. Para cada estación hidrográfica se evaluó el promedio mensual de la temperatura y salinidad de la “capa superficial”, utilizando todos los datos disponibles por estación para el periodo de 2015 a 2019. Nótese, que la base de datos MOHICOVER tiene varios hoyos (ver tabla II), el sesgo que pudiese generar esto en los promedios mensuales no fue considerado en este estudio.

En la figura 12 se muestran los promedios mensuales (y error estándar) de salinidad y temperatura de la capa superficial, correspondiente a las cuatro estaciones hidrográficas MOHICOVER que fueron seleccionadas para representar el comportamiento del agua de superficie en cada anclaje. Estas series de tiempo fueron nombradas SUP1 a SUP4, donde SUP1 representa la estación más cercana a la boca del estuario y SUP4 la más alejada.

De las series de tiempo SUP1-SUP4, se puede decir que: (1) en las cuatro estaciones la salinidad superficial fue más alta durante la época de secas, en comparación con lo observado en la época de lluvias, (2) en las cuatro estaciones el promedio mensual de la salinidad mostraron oscilaciones de ~ 2 unidades durante los meses de secas, mientras que durante los meses de lluvias, el promedio mensual de la salinidad fue casi-constante. (3) La SUP1 (línea roja) tuvo los máximos valores de salinidad a lo largo del año, donde el rango fue de 2 a 13 unidades de sal. (4) Las estaciones SUP2 y SUP3 (línea azul y línea negra respectivamente) mostraron un comportamiento muy similar entre ellas a lo largo del año, exhibiendo un rango

de salinidad de 2 a 8 unidades. (5) La salinidad de SUP4 (línea magenta) se mantuvo entre 0 y 2 unidades a lo largo del todo año, y no mostró fuertes oscilaciones.

En el caso de la temperatura (Figura 12-b) las cuatro estaciones presentan valores muy cercanos, y un comportamiento estacional, con valores más altos en los meses abril a junio y los más bajos entre los meses de diciembre a marzo. La temperatura en temporada de secas tuvo un rango entre los 23 y los 32 °C, presentando valores máximos en los 4 sitios durante el mes de mayo, y se observa cómo la temperatura disminuye con la temporada de lluvias a un rango entre 25-30 °C, disminuyendo progresivamente de junio-noviembre.

A partir de estos datos se generaron series de tiempo diarias para los sitios del SUP1 al SUP4, con una interpolación lineal (figura 13).

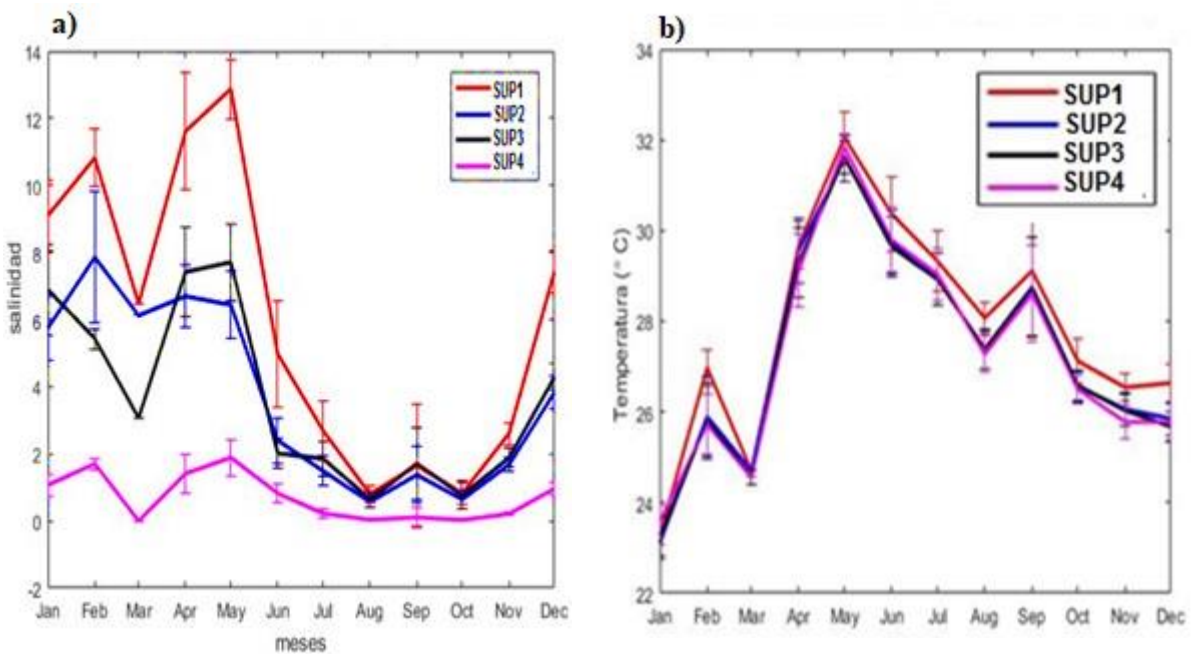


Figura 12. Promedios mensuales superficiales mensuales de los lances del MOHICOVER del periodo 2015-2019 en los sitios SUP1, SUP2, SUP3 y SUP4 de a) salinidad y b) temperatura.

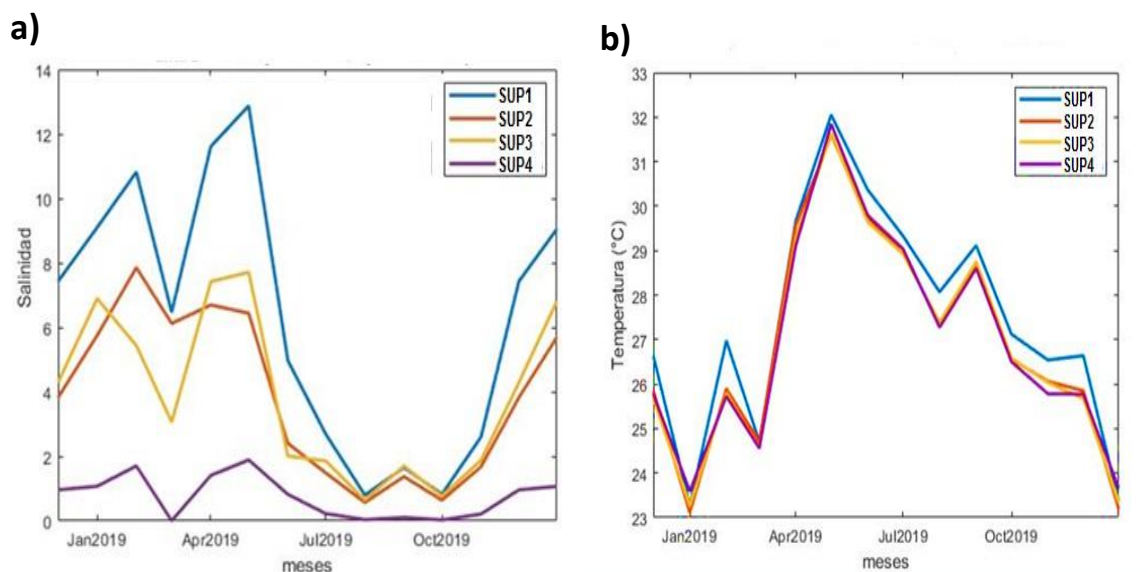


Figura 13. Series de tiempo diarias en los sitios SUP1, SUP2, SUP3 y SUP4 de a) salinidad y b) temperatura a 0.20 m.

9.5 Análisis de las Series de Tiempo de Salinidad y Temperatura de los CTD anclados

Se obtuvieron series de tiempo de temperatura y salinidad cercanas al fondo de los cuatro anclajes equipados con CTD's, las series de tiempo corresponden a 13 meses, con un intervalo de muestreo de 10 min. En la figura 14a y 14b se muestran las series de tiempo de salinidad y temperatura respectivamente, para los 4 anclajes, los cuales están graficados con distinto color, donde ANC1 es el más cercano a la boca y ANC4 el que se encuentra río adentro. En dichas series se puede observar que: La salinidad (Figura 14 a y tabla IV) de diciembre a mayo durante la temporada de secas tiene variaciones entre los 22 a las 35 unidades, presentando un gradiente de la boca hacia río arriba, con los mayores valores de salinidad en ANC1 y disminuyendo hacia ANC4. Durante los meses de junio a noviembre (lluvias) se muestra una disminución drástica de la salinidad llegando a valores de cero, observándose más marcado en los ANC3 y ANC4.

Las temperaturas (Figura 14b y tabla V) en cada uno de los anclajes tuvieron un comportamiento similar, los 4 anclajes durante la temporada de secas se mantuvieron por

debajo de los 26 °C, siendo relativamente mas frías en las zonas cercanas al mar (ANC1), sin embargo al llegar a los meses de abril a mayo, la temperatura empieza a aumentar gradualmente, alcanzando valores de 31 °C, en los 4 anclajes, al iniciar la temporada de lluvias la temperatura disminuye un poco y presenta una mayor variacion entre 30 °C y 26 °C. por ultimo en el mes de octubre comienza a disminuir gradualmente la temperatura. La temperatura más alta registrada estuvo en ANC4, mientras que la minima se registro en ANC1.

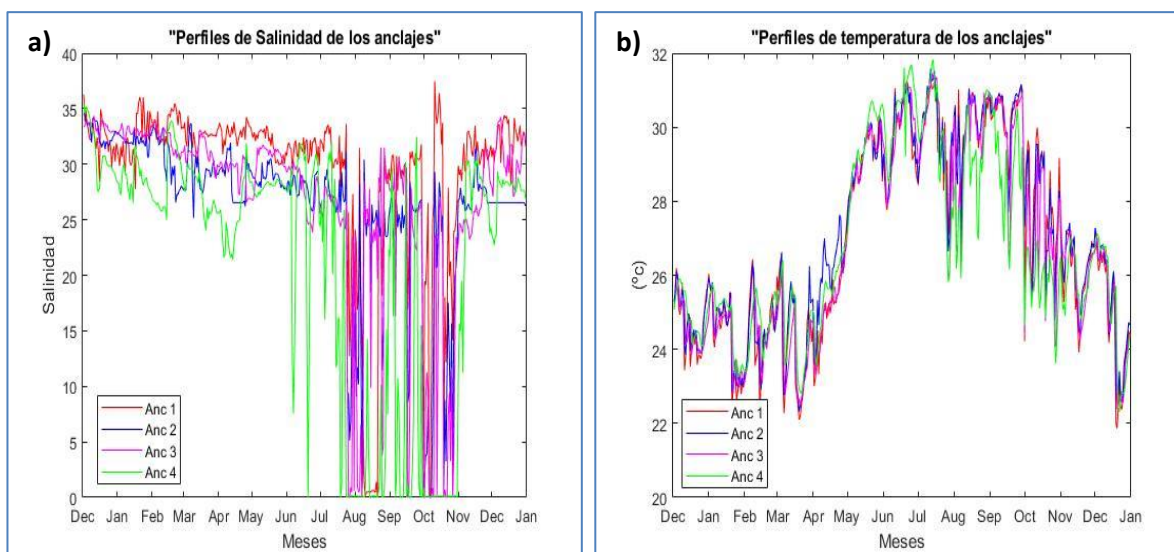


Figura 14. Series de tiempo de salinidad (a) y temperatura (b), donde las líneas representa a cada uno de los anclajes: ANC1 (rojo), ANC2 (azul), ANC3 (magenta), ANC4 (verde)

Tabla IV. Promedios y desviaciones estándar de la salinidad en los 4 anclajes

	Salinidad					
	Promedio	Desviación estándar	Promedio Secas	Desviación Estándar	Promedio Lluvias	Desviación Estándar
ANC1	29.5	8.8	32.54	1.50	26.71	9.19
ANC2	23.2	11.3	28.06	3.41	23.15	8.22
ANC3	26.74	9.3	31.26	1.73	22.61	9.87
ANC4	21.1	12.1	27.86	3.07	15.21	13.02

Tabla V. Promedios y desviaciones estándar de la temperatura en los 4 anclajes

	Temperatura (°C)					
	Promedio	Desviación estándar	Promedio Secas	Desviación Estándar	Promedio Lluvias	Desviación Estándar
ANCI	27.0	2.7	24.66	1.11	29.03	1.69
ANC2	27.1	2.6	24.92	1.16	29.03	1.71
ANC3	26.8	2.6	24.69	0.91	28.74	1.91
ANC4	26.8	2.4	24.96	0.91	28.42	2.07

9.6 Análisis Espectral de las Series de Tiempo

El análisis espectral de una serie de tiempo, sirve para conocer cómo se distribuye su energía en cada banda de frecuencias. Con este análisis se obtiene la densidad espectral de potencia de cada una de las series de tiempo, la cual nos sirve para conocer la distribución de la potencia de la serie de tiempo a lo largo de las distintas frecuencias que la forman, por lo que podemos establecer rangos de frecuencias donde se concentran las variaciones de energía. Estos análisis en el dominio de la frecuencia resultan de gran ayuda, ya que se pueden discriminar las variaciones más fácilmente que en el dominio del tiempo. Se calculó la densidad espectral de potencia con la ecuación 6 (Emery y Thomsom, 2001).

$$\phi(w) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau) e^{-i2w\tau} d\tau \quad (6)$$

Donde $R_{xx}(\tau)$ es la función de autocorrelación. Este análisis se realizó con el fin de obtener los forzamientos sobre la cuña salina a lo largo del estuario, comparando la distribución de energía entre las diferentes series de tiempo. Primero se separaron las series de tiempo en bajas y altas frecuencias, para lo que se utilizó filtro Lanczos con frecuencia de corte de 36 h.

9.7 Análisis de Alta Frecuencia

Se calculó el espectro de potencia de las series de salinidad de los cuatro anclajes, considerando solo las altas frecuencias así como el espectro de potencia de la magnitud del viento. En la figura 15 se pueden observar los espectros de la salinidad de los cuatro sitios y de la magnitud del viento. Los anclajes muestran en general el mismo comportamiento, solo difiriendo en la magnitud de la densidad de energía espectral. Mostrando tres picos de energía bien definidos en los periodos de 12.4378, 23.9406 y 25.7533 h, que corresponden a los constituyentes de marea M_2 (Constituyente de mareas semidiurnas, debido a la luna), K_1 (constituyente solar-lunar) y O_1 (constituyente mareas diurnas, debido a la luna). Siendo más visible en ANC1, el cual se encuentra en la boca del estuario, la energía es más alta en el periodo de 12.4378 h, y es menor en el periodo de 25.7533 h, por otro lado en la misma figura en color negro está el espectro de la magnitud del viento, el cual solo presenta un pico bien definido de energía en la frecuencia que corresponde a 24 h, cuyo efecto se relaciona con el fenómeno de brisas que ocurre en la zona costera, produciendo cambio en la dirección del viento durante las mañanas y tardes-noches (Osorio-Tai, 2015).

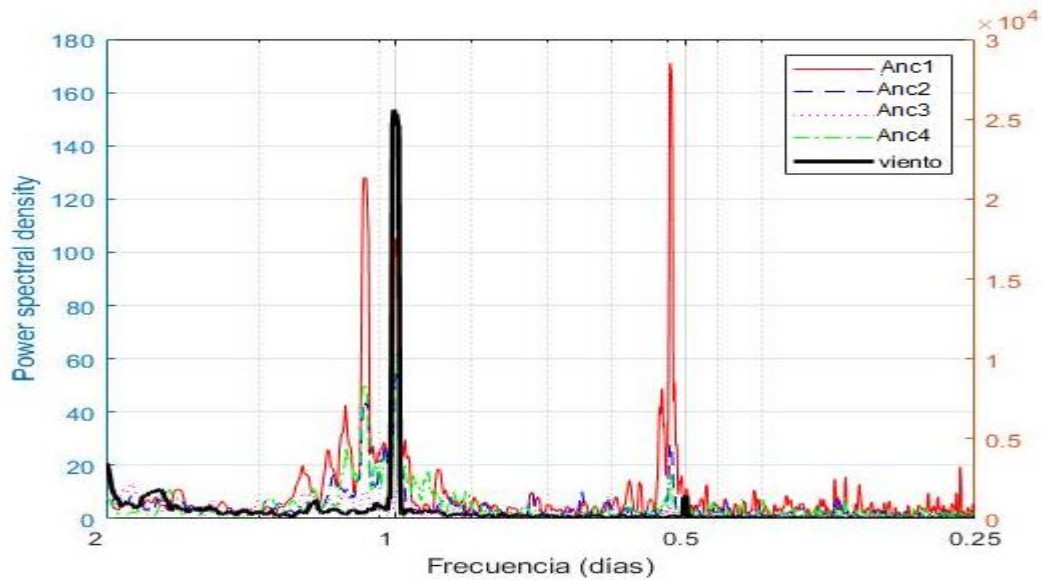


Figura 15 Espectros de potencia de la salinidad de los 4 anclajes y magnitud del viento

9.8 Análisis espectros cruzados de alta frecuencia

El análisis de espectros cruzados sirve para identificar las frecuencias en las que dos series de tiempo están correlacionadas, así como también obtener información sobre la magnitud y desfase entre estas series. Para el cálculo del espectro cruzado se tomó la función. $R_{xy}(\tau)$. La figura 16, muestra la coherencia obtenida con el espectro cruzado entre cada una de las series de salinidad de los anclajes contra la serie de magnitud del viento.

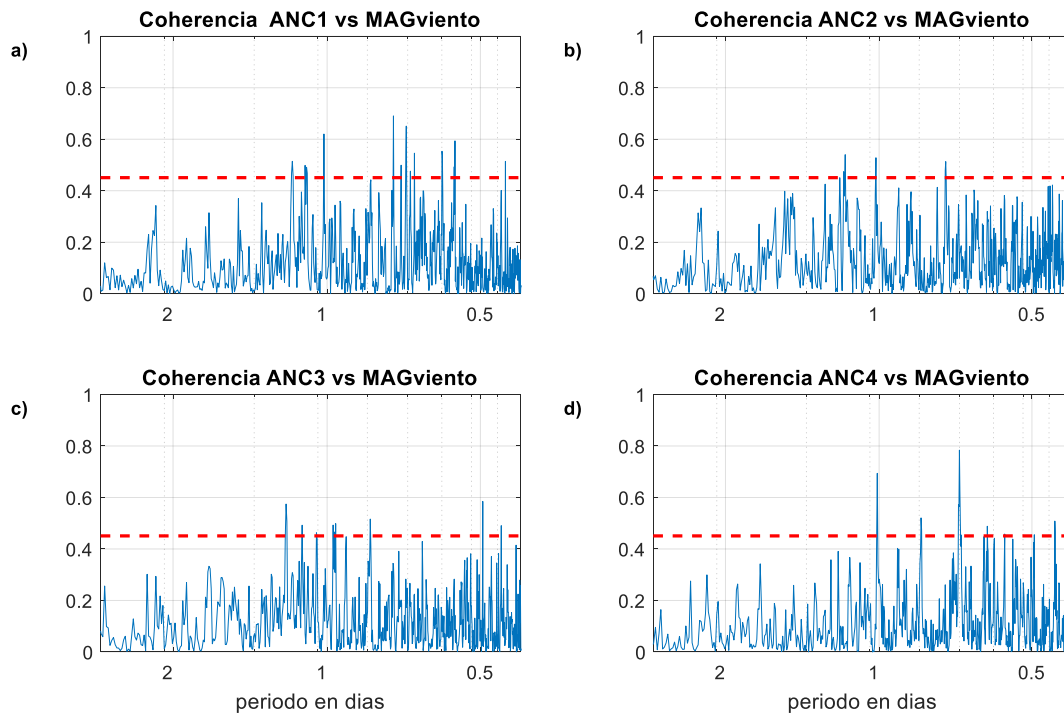


Figura 16. . Coherencia entre la salinidad de cada uno de los anclajes con respecto a la magnitud del viento; la línea segmentada indica el nivel de coherencia significativa al 95%

En la figura 16, se muestra la coherencia entre el espectro de la magnitud del viento, contra los espectros de la salinidad en los cuatro sitios (a-d), la línea segmentada roja indica el nivel de significancia al 95%. Como se muestra en la figura 16, en el periodo de 1 día se observó un pico de energía tanto en viento como en las salinidades, por lo que, si existe coherencia entre estas dos series, esperaríamos un pico por arriba del nivel de significancia en dicho periodo. En todos los casos si existe un pico en ese periodo en los cuatro sitios, siendo más alto y definido y con mayor correlación en ANC4, mientras que en ANC3, el valor apenas y sobrepasa el nivel de significancia.

9.9 Análisis de Baja Frecuencia

Las bajas frecuencias fueron obtenidas mediante un filtro con corte a 36 h. En la figura 17 se muestran los espectros obtenidos siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, para el caso de bajas frecuencias aparte de contar con las series de tiempo de los anclajes (temperatura y salinidad) y magnitud del viento, se contó también con la serie de tiempo de descarga del río. En la gráfica se muestran con diferentes colores los espectros de la salinidad en los cuatro anclajes, de la magnitud del viento y de la descarga del río; se puede apreciar un pico definido entre frecuencias correspondientes a 16-18 días, también se presenta un aumento de la energía en las frecuencias correspondientes a 10-11 y 6 días y las cuales están presentes tanto en el espectro de la descarga (línea negra) como en los espectros de la salinidad en los cuatro anclajes (líneas de colores), en el espectro del viento (línea amarilla) solo aparece energía en frecuencia de 2,5 y 6 días. A diferencia de las altas frecuencias, aquí se observa como existe mayor diferencia entre los picos de energía de salinidad en los cuatro anclajes, siendo el ANC4 el que presenta en general mayor energía en comparación a los otros, siendo este el que está más hacia la cabeza del estuario.

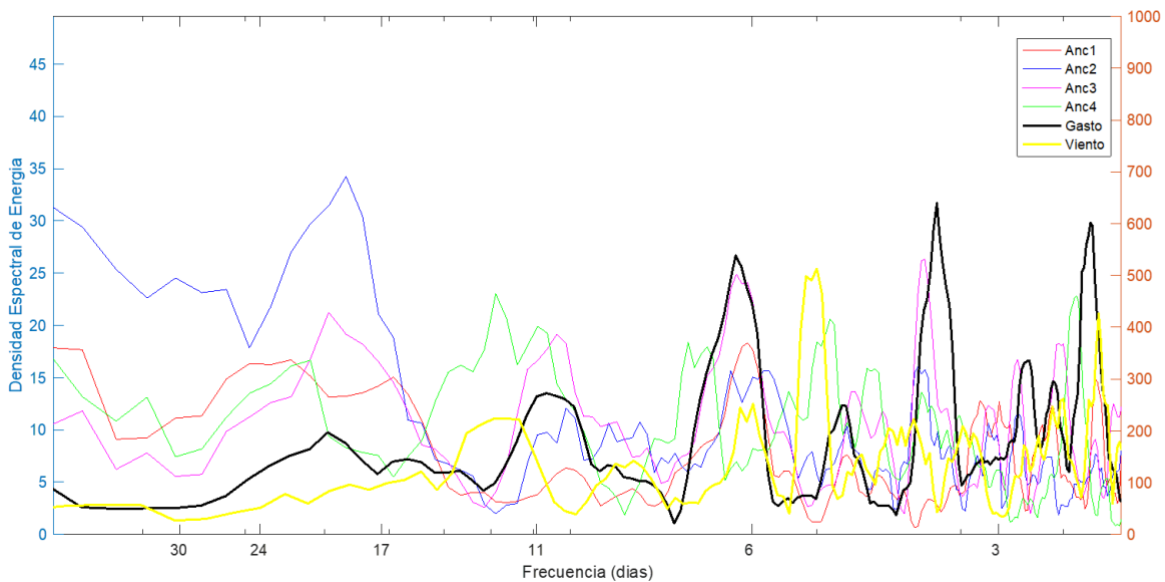


Figura 17. Espectros de potencia de la descarga de los 4 anclajes

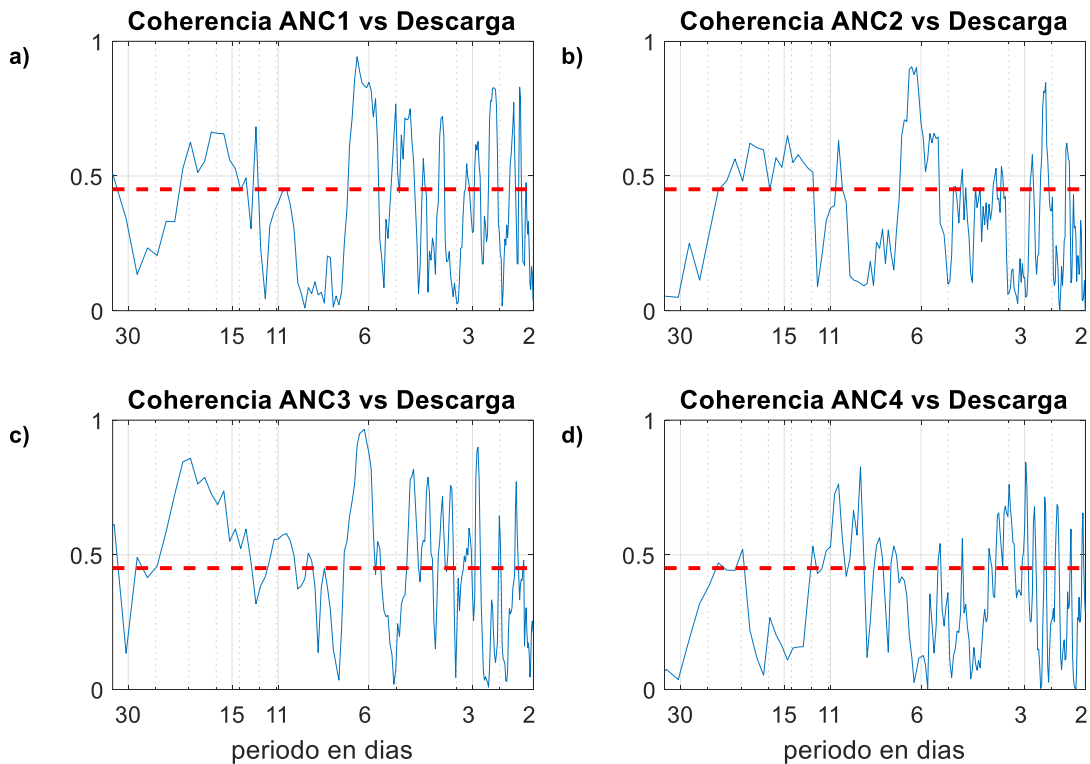


Figura 18. Coherencia entre la salinidad de cada uno de los anclajes con respecto a la descarga del río; la línea segmentada indica el nivel de coherencia significativa al 95%

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en las bajas frecuencias, se obtuvieron espectros cruzados entre las series de salinidad en los cuatro sitios contra la magnitud del viento, y después contra la descarga del río. Para el caso de la magnitud del viento contra la salinidad, en ninguno de los sitios se encontró coherencia significativa en las frecuencias que presentaban energía. Por lo que en lo que se refiere a bajas frecuencias no existe coherencia significativa entre estas series y por lo tanto no se incluyeron las gráficas. Para el caso de las series de salinidad contra la descarga del río, la figura 18a muestra el espectro cruzado entre la descarga y la salinidad en el anclaje 1, el cual muestra que si existe coherencia significativa para frecuencias correspondientes a 16-18 días y 6 días respectivamente, mientras que para el periodo de 10-11 días no existe coherencia significativa.

La figura 18b muestra el espectro cruzado entre la descarga y la salinidad en el anclaje 2, en este caso si existe coherencia significativa en los tres periodos (16-18, 10-11 y 6 días) siendo al igual que en el caso anterior la coherencia mayor en el periodo de los seis días. La figura 18c muestra el espectro cruzado entre la descarga y la salinidad en el anclaje 3, el cual

también presenta coherencia significativa en dichos periodos. La figura 18d muestra el espectro cruzado entre la descarga y la salinidad en el anclaje 4, en este caso solo muestra coherencia significativa para el periodo entre 10-11 días.

10. Potencial teórico de Energía de Gradiente salino

El potencial teórico de la EGS se obtiene evaluando las variaciones de la energía libre de Gibbs. Esta cantidad teórica usa toda la energía disponible en el sistema, sin tomar en cuenta la eficiencia de la tecnología con la que se pretenda extraer dicha energía. Esta cantidad de energía puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta G_{Mezclado} = G_{Mezclado} - (G_{concentrado} + G_{diluido}) \quad (7)$$

donde G es la energía libre de Gibbs, y los subíndices indican las diferentes concentraciones de las soluciones empleadas.

Para los cálculos del potencial de energía del gradiente salino, se hicieron estas consideraciones: 1) Las salinidades son debidas únicamente a los iones de sodio y cloro, los cuales representan el 87% de los iones presentes en el agua del mar. 2) Las moles de 1 m³ de la solución de agua salada/dulce son equivalentes a 1 m³ de agua salada/dulce. 3) No hay transferencia de calor a los alrededores (mezclado ideal) y 4) Los volúmenes son aditivos (solución ideal). Con estas consideraciones se siguieron los pasos descritos por Álvarez *et al.*, (2016) para el cálculo de la energía, siguiendo los siguientes pasos:

Paso1: Primero se calcularon los moles totales de las soluciones (utilizando los datos de la densidad del agua y su masa molar).

$$MT_{sol} = \left(\frac{\rho_{H_2O} * 1000}{MH_2O} \right) \quad (8)$$

Paso 2: Se calculó la concentración (dada en mol m⁻³) obtenida de la salinidad agua de mayor y de menor cantidad de sales a partir de la masa molar del cloruro de sodio (g mol⁻¹), expresada en la siguiente fórmula:

$$C_i = \frac{[Salinidad]}{MNaCl} * 1000 \quad (9)$$

Paso 3: La concentración de la solución de mezcla de la salinidad, se obtuvo de dividir la diferencia de salinidades entre dos:

$$C_m = \frac{\Delta Salinidad}{2} \quad (10)$$

Paso 4: El siguiente paso fue el cálculo de la fracción molar (X_i) del cloruro de sodio, donde los valores de la concentración obtenidos en el paso anterior (tanto para la solución de agua de mayor como la de menor concentración, calculados por separado) fue dividido entre los moles totales de solución del paso 1 (MTsol), como se muestra a continuación:

$$X_{iNaCl} = \frac{2 * C}{MTsol} \quad v \quad (11)$$

Paso 5: La solución de mezcla para la fracción molar del cloruro de sodio, se obtuvo al sumar el agua de mayor y menor concentración de salinidad entre los moles totales de solución al que se le restó la fracción molar, tanto la concentración más alta como la menor de la salinidad del agua:

$$X_{mNaCl} = \frac{(C_s + C_d)}{(MTsol - C_s - C_d)} \quad (12)$$

Paso 6: El cálculo de la fracción molar (X_i) del agua, el cual es el resultado de la resta de uno menos la fracción molar de la solución de cloruro de sodio para cada una de las soluciones, expresada:

$$X_{iH_2O} = 1 - [X_{iNaCl}] \quad (13)$$

Paso 7: Aquí se obtuvo la energía libre de Gibbs (dada en Joules) en la solución de mayor y menor concentración salina (agua de mar y de río), a partir de la multiplicación de los moles totales de solución por la temperatura ($^{\circ}K$), por la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J (mol K)}^{-1}$), por la fracción molar del cloruro de sodio, así como por el logaritmo natural de la fracción molar del cloruro de sodio, sumada a la fracción molar del agua (la cual se multiplico por su logaritmo natural):

$$G = -MTsol * T * R * (X_{NaCl} * \ln(X_{NaCl}) + X_{H_2O} * \ln(X_{H_2O})) \quad (14)$$

La solución de mezcla de la energía libre de Gibbs para cada una de las soluciones (agua de mar y río), se calculó mediante formula 14, donde $Mtsol$ es el valor duplicado de los Moles totales de la solución, T la temperatura, R es la Constante Universal de los gases, X_{NaCl} es la fracción molar del Cloruro de Sodio (este a su vez multiplicado por su logaritmo natural), y así mismo multiplicado por la fracción molar del agua (que había sido multiplicado por su logaritmo natural).

Paso 8: Se calculó el potencial total ($J s^{-1}$), el cual es el mismo que la densidad de energía ($J m^{-3}$) y dicha energía es el resultado de la resta de la cantidad de energía en la solución de mezcla de la energía libre de Gibbs, menos la energía libre de Gibbs de la solución de mayor concentración salina (agua de mar) y a esto se le resta la energía libre de Gibbs de la solución de menor concentración salina (agua de río), expresado como:

$$\rho E = SolmG - EGMC - EGmc \quad (15)$$

Paso 9: La Potencia (kW) es la densidad de energía sobre mil:

$$PotT = \frac{\rho E}{1000} \quad (16)$$

Paso 10: La energía total (kWh), es la potencia total sobre 3600:

$$ET = \frac{PotT}{3600} \quad (17)$$

Paso 11: La energía total mensual (kWhm), es resultado de la energía total multiplicada por 3600 por 24 por 30:

$$ETm = ET * 3600 * 24 * 30 \quad (18)$$

En las siguiente graficas (figura 19) se muestran los potenciales teóricos de energía de gradiente salino expresados en Joules sobre metro cúbico ($J m^{-3}$) para cada uno de los 4 anclajes. La figura 19a muestra la energía de gradiente salino en el anclaje 1, teniendo un promedio anual de $0.8290 * 10^5 J m^{-3}$. Durante la temporada de secas los valores de la energía estuvieron la mayoría del tiempo por debajo del promedio anual la mayoría del tiempo, para

la temporada de lluvias los valores de la energía comienzan a aumentar, llegando a duplicar los valores de la temporada de secas, sin embargo, durante esta temporada, existen periodos en los que la energía cae abruptamente hasta valores cercanos a cero.

Para el anclaje 2 (figura 19b) la energía del gradiente salino tuvo un promedio anual de $0.81630 \cdot 10^5 \text{ J m}^{-3}$, en este caso durante la temporada de secas la energía se mantiene más cercana la promedio. Durante la temporada de lluvias el comportamiento es parecido al del anclaje 1 con un aumento en la energía, pero con un mayor número de periodos con caídas abruptas de ésta.

El anclaje 3 (figura 19c), presentó un promedio anual de energía de $0.98355 \cdot 10^5 \text{ J m}^{-3}$, el comportamiento de la energía a lo largo del año en las dos temporadas es muy parecida, presentado más caídas de la energía en la temporada de lluvias.

El anclaje 4 (figura 19d), posee un promedio anual de energía de $1.2271 \cdot 10^5 \text{ J m}^{-3}$ el promedio más alto de los tres anclajes. Para este anclaje los valores en la temporada de secas están por arriba del promedio anual, durante la temporada de lluvias para casi todo el periodo muestra valores bajos y los valores más altos que se presentan son de la misma cantidad de los valores presentados en secas.

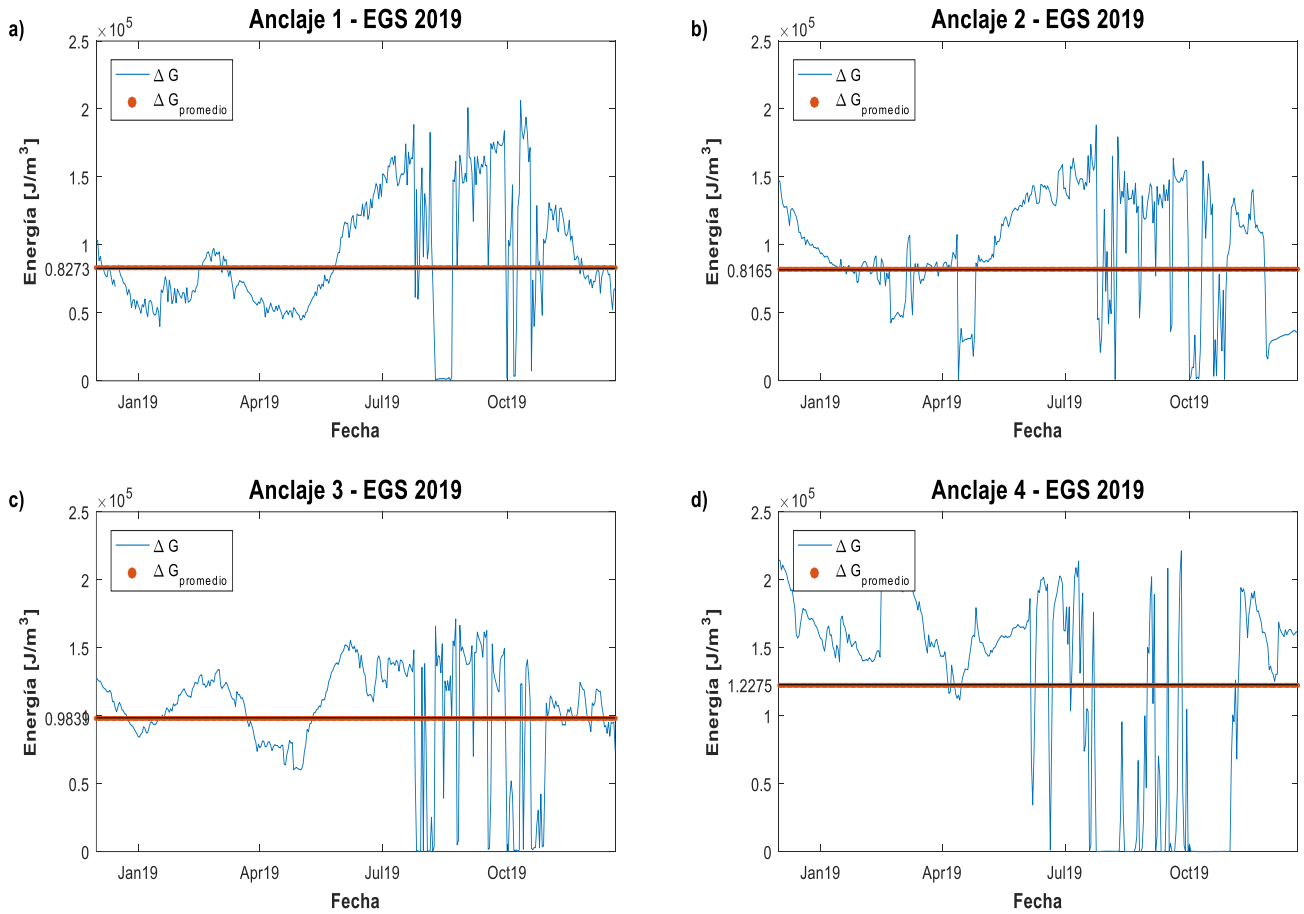


Figura 19. Energía teórica de gradiente salino en los 4 anclajes.

La figura 20, muestra la serie de tiempo diarias en kWh^{-1} del año de estudio; con este grafico se da a conocer los valores diarios de energía por temporada y se evidencian los meses y las temporadas en que se presenta la mayor cantidad de energía por día, en los diferentes puntos del estuario, El grafico también permite identificar cuál es la zona que tiene la mayor cantidad de energía y su variación en la temporada de lluvias y secas, a continuación se describe el comportamiento de cada anclaje.

El anclaje 1, durante temporada de secas, entre los meses de enero a marzo, la energía se colocó entre $1,000$ y $2,000 \text{ kWh}^{-1}$, en el mes de abril hay un aumento superior de $2,000 \text{ kWh}^{-1}$, en mayo la energía vuelve a disminuir por debajo de $2,000 \text{ kWh}^{-1}$, al llegar la temporada de lluvias en la energía se mantiene menor de $2,000 \text{ kWh}^{-1}$ y en julio y agosto los

picos de energía aumentan por arriba de 4,000 kWh⁻¹, durante el mes de septiembre cae por debajo de 1,000 kWh⁻¹, aumentando a valores cercanos de 3,000 kWh⁻¹ en septiembre, octubre y noviembre la energía presenta picos que caen a 0 kWh⁻¹.

El anclaje 2, en la temporada de secas de los meses de enero a abril la energía varía entre 3,000 a cerca de 1,000 kWh⁻¹, en el mes de mayo, la energía disminuye con picos en 0 kWh⁻¹ y otro pico cerca de 2,000 kWh⁻¹. En la temporada de lluvias de los meses de junio a agosto, los picos alcanzaron valores de energía por arriba de 3,000 kWh⁻¹, en el mes de septiembre los picos de energía varían entre cerca de 3,000 kWh⁻¹ y por debajo de 1,000 kWh⁻¹, el mismo comportamiento se observó durante el mes de noviembre.

El anclaje 3, durante la temporada de secas en los meses de enero a marzo los picos de energía se encuentran por debajo de 3,000 kWh⁻¹, pero en marzo y abril la energía vuelve a colocarse cercana a 3,000 kWh⁻¹, pero en el mes de mayo cae por abajo de 2,000 kWh⁻¹, al llegar la temporada de lluvias de junio a agosto los picos de energía varían de mayor a menor de 3,000 kWh⁻¹, y en septiembre cae a 0 kWh⁻¹ y en octubre y noviembre los picos se colocan entre 3,000 y 0 kWh⁻¹.

El anclaje 4, durante la temporada de secas de enero a marzo la energía se posiciona entre 5,000 y menor a 4,000 kWh⁻¹, volviendo a aumentar a 5,000 kWh⁻¹ en abril y entre 4,000 y menor de 3,000 kWh⁻¹ en mayo, al llegar la temporada de lluvias en el mes de junio la energía posee valores cercanos a 4,000 kWh⁻¹, en julio hay picos de cero pero también energía mayor de 4,000 kWh⁻¹, durante el mes de agosto y septiembre la energía cambia de 4,000 kWh⁻¹ a posicionarse en 0 kWh⁻¹ casi todo el mes, en octubre y noviembre hay picos de energía por arriba de 4,000 kWh⁻¹ pero también de 0 kWh⁻¹ en los meses.

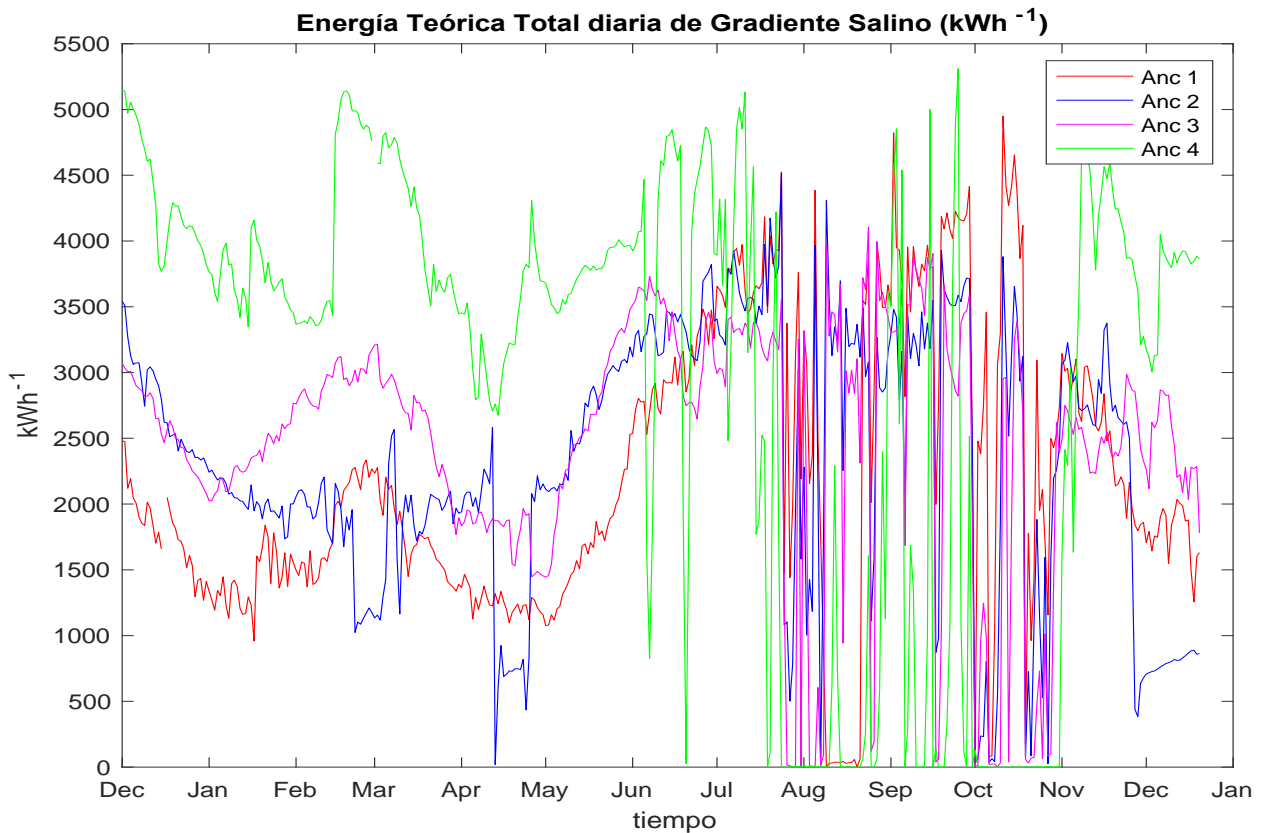


Figura 20. Energía teórica de gradiente salino en los 4 anclajes en kWh⁻¹

La figura 21 muestra la serie de tiempo de kWhmes⁻¹, con el fin de conocer la cantidad promedio de energía durante todo el mes en cada uno de los anclajes en las temporadas.

El anclaje 1 muestra, durante las temporadas de secas en los meses de enero a mayo una energía teórica entre 4 y 6×10^4 kWhmes⁻¹ al entrar la temporada de lluvias, durante los meses de junio y julio aumenta hasta 10×10^4 kWhmes⁻¹, en el mes de agosto hay una disminución de energía menor de 6×10^4 kWhmes⁻¹, de octubre a noviembre cambio de 8×10^4 kWhmes⁻¹ a menores de 6×10^4 kWhmes⁻¹.

El anclaje 2, durante la temporada de secas durante los meses de enero a abril oscila cambia por debajo y por encima de 8×10^4 kWhmes⁻¹ y en mayo cae por debajo de 6×10^4 kWhmes⁻¹ y durante la temporada de lluvias, en los meses de junio a agosto, el promedio de la energía se encuentra entre 8 y 10×10^4 kWhmes⁻¹, y de octubre a noviembre cae de 8 a valores cercanos a 6×10^4 kWhmes⁻¹.

El anclaje 3 en la temporada de secas se observa en los meses de enero a abril, valores cercanos a 8×10^4 kWhmes⁻¹, en mayo la energía disminuye a valores menores a 6×10^4 kWhmes⁻¹ y al acercarse la temporada de lluvias de junio a agosto la energía promedio mensual vario de 8×10^4 kWhmes⁻¹ a 7×10^4 kWhmes⁻¹ y en octubre cae a 4×10^4 kWhmes⁻¹, aumentando en noviembre a 6×10^4 kWhmes⁻¹.

El anclaje 4, durante la temporada de secas de enero a abril la energía se posiciona en 12×10^4 kWhmes⁻¹, en mayo hay una ligera disminución y cae en 10×10^4 kWhmes⁻¹, en la temporada de lluvias y en el mes de junio el pico de energía se encuentra en 12×10^4 kWhmes⁻¹, pero de julio a septiembre la energía cae gradualmente hasta llegar a valores menores a 2×10^4 kWhmes⁻¹, en octubre cambia de 4 a 0 kWhmes⁻¹ y en noviembre el pico incrementa hasta 10×10^4 kWhmes⁻¹.

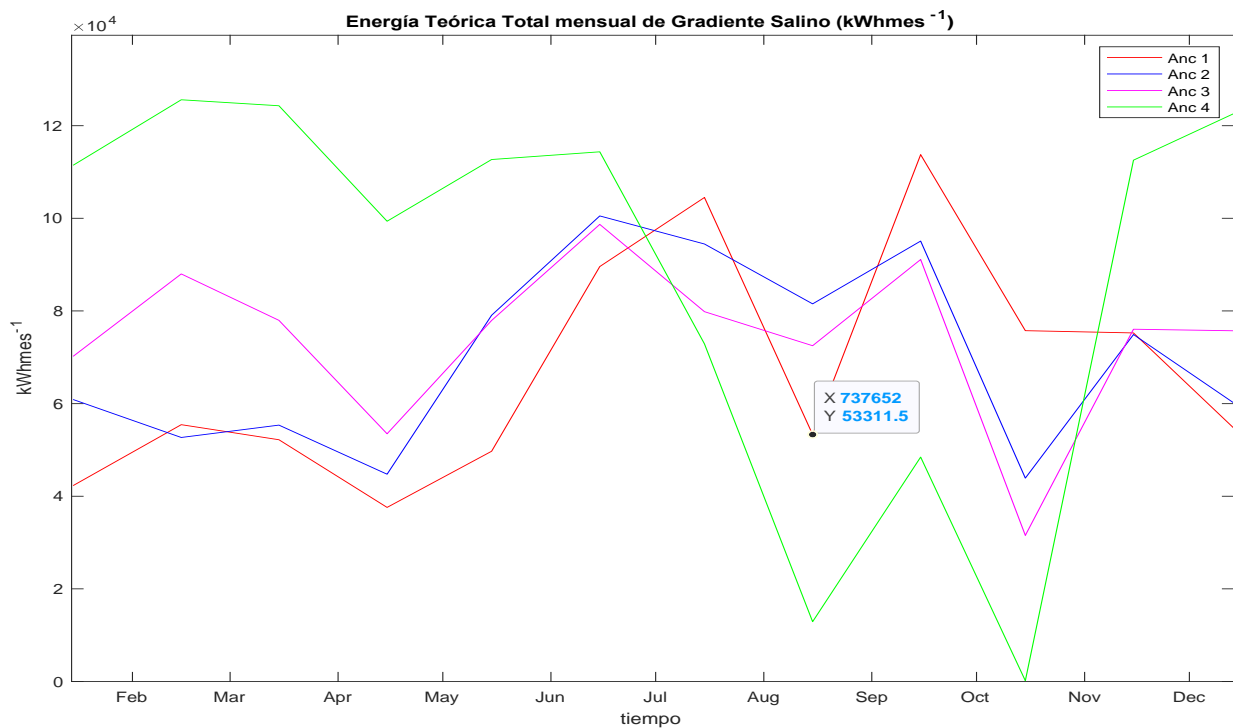


Figura 21. Energía teórica de gradiente salino en los 4 anclajes en kWhmes⁻¹

Todos estos resultados obtenidos de energía teórica, son considerando la mezcla de un metro cúbico de agua con mayor salinidad y un metro cúbico de agua con menor salinidad. Para obtener el cálculo de la energía teórica total en cada uno de los sitios a lo largo del año, habría que multiplicar los valores obtenidos de la energía teórica por lo metros cúbicos de descarga a lo largo del año. Con lo cual la diferencia entre las temporadas (secas/lluvias) se ampliaría. Ocupando los valores promedio anuales obtenidos en cada uno de los cuatro sitios, se calculó la energía teórica anual del sistema, ocupando también el promedio de descarga anual. Aunado a esto, también se realizó el cálculo con el 20% del caudal que es lo que se recomienda utilizar para evitar daños al sistema (Álvarez *et al.*, 2014). Obteniendo que en promedio el sitio con mayor energía potencial teórica promedio es el sitio 4.

Tabla VI. Energía potencial promedio kWh⁻¹, kWhaño⁻¹ y kWhaño⁻¹ al 20% en los 4 sitios.

	Energía Potencial Promedio kWh año⁻¹ x m³	Energía Potencial Promedio kWh año⁻¹ x promedio descarga (32.5 m³)	Energía Potencial Promedio kWh año⁻¹ x 20% descarga (6.5 m³)
Sitio 1	714,787.2	23,230,584.0	4,646,116.8
Sitio 2	705,456.0	22,927,320.0	4,585,464.0
Sitio 3	850,089.6	27,627,912.0	5,525,582.4
Sitio 4	1,060,560.0	34,468,200.0	6,893,640.0

11. Discusión

Uno de los principales factores limitantes para la obtención de EGS en estuarios es la disponibilidad de agua dulce, es decir la descarga del río. En este trabajo se encontró que el río Jamapa presenta una descarga promedio anual de $78.16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, difiriendo con el resultado encontrado por Perales-Valdivia *et al.* (2018) donde encuentra un promedio anual de $66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esta diferencia de poco más de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el promedio anual, se debe solamente al incremento de años utilizados para la obtención de dicho cálculo, para este trabajo la series de tiempo de descargas utilizadas es de 67 años. El resultado obtenido para la descarga promedio anual para el periodo de estudio 2018-2019 fue de $32.50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, siendo un 41% por debajo del promedio anual encontrado en el periodo de 67 años. Si se separa en temporada de lluvias y secas obtenemos que el promedio para la temporada de lluvias fue un 52% menor que el promedio de los 67 años ($92.51 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ vs $48.93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y para la temporada de secas fue prácticamente el mismo ($17.57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ vs $17.75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Lo que nos indica que el año de estudio fue un año anómalo presentando valores bajos de descarga. Esta disminución en la descarga promedio puede deberse a diversos factores siendo el principal la menor cantidad de lluvia, que pudo ser impactada por el fenómeno del niño 2018-2019 (Bravo Cabrera, *et al* 2010), y el cual esta reportado como, el tercer año más seco de su historia (CONAGUA, 2019), la disminución en la descarga también puede acrecentarse debido a la extracción de agua para la agricultura y el uso doméstico, cada vez más común en las zonas altas del rio debido al aumento de la población (INECC, 2005). Estos resultados tienen que ser tomados en cuenta si se quiere obtener EGS en el río Jamapa, ya que los valores teóricos del potencial energético total obtenidos en este estudio están en función de la descarga del río.

Al graficar los perfiles verticales de salinidad se observaron las variaciones de la cuña salina en cada una de las temporadas, donde se muestra que, en la temporada de secas, la cuña salina se adentra más de 8 Km río arriba, mientras que en la temporada de lluvias hay desplazamiento de la cuña salina hacia la boca (cerca del anclaje 1). En cuanto a los perfiles

verticales de temperatura y su variación en las diferentes temporadas se observó que no hay mucha diferencia en la vertical, entre la temperatura de la cuña salina y el agua de la descarga del río, en general las temperaturas son casi homogéneas en toda la columna del agua. La más alta variación se presentó en julio con un intervalo de 3 °C. La temperatura presentó una variación anual con temperaturas más bajas en los meses de otoño-invierno y más altas en los meses de primavera-verano.

Se generaron las series temporales diarias de salinidad y temperatura superficial a partir de los perfiles de CTD del proyecto MOHICOVER, con el fin de obtener las salinidades y temperaturas asociadas a la descarga del río (la masa de agua dulce o con menor salinidad), lo que se encontró es que aunque las salinidades son bajas, dado que teóricamente es en su mayoría agua dulce, se observa que entre más cercanos a la boca del estuario encontramos un aumento en la salinidad, llegando en ANC1 hasta 12 unidades, lo cual concuerda con lo encontrado por Perales-Valdivia *et al* (2018). En la boca del estuario, se observa también que esta pequeña mezcla que existe en el estuario es mayor durante la temporada de secas, lo cual es lo esperado para estos sistemas. En lo que se refiere a la temperatura superficial de la masa de agua dulce, el comportamiento es parecido al de la temperatura en cuña salina, con temperaturas bajas en otoño-invierno y más elevadas en primavera-verano, para la parte superficial el mes más cálido es mayo, mientras que para la profunda es en julio y agosto, esta diferencia se debe a que el agua de la parte superficial del estuario está más relacionada con la temperatura del aire, mientras que la de la parte profunda del estuario, la cual es prácticamente agua de mar sigue el comportamiento descrito por Mateos-Jasso *et al* (2012).

Perales-Valdivia *et al* (2018) reporta que cuando la descarga alcanza los $70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, la cuña salina es expulsada fuera del estuario. Lo que se observa en este estudio en relación al movimiento hacia la boca del estuario de la cuña salina, es que al igual que la descarga, se observan pulsos de corta duración con valores de salinidad que llegan prácticamente a cero unidades de salinidad, y esto se observa en todos los anclajes asociados a los pulsos de la

descarga. En particular para el ANC1, próximo a la boca del estuario, se observa que con pulsos de descarga por arriba de $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, se tienen valores de cero de salinidad (desplazamiento de la cuña hacia fuera del estuario), sin embargo, también hay ocasiones en donde, aunque existe una descarga por arriba de $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, no se observa disminución en la salinidad. Esto probablemente se deba a que la duración del pulso de la descarga fuera muy corta en el tiempo. También influye la fase de marea, y el viento.

Se realizaron análisis de espectros de energía, donde se dividieron las series de tiempo en alta y baja frecuencia con un corte de 36 h. En lo que se refiere a la alta frecuencia se encontró que la salinidad en los cuatro anclajes presentaba tres picos de energía, mientras que la magnitud del viento solo presenta un pico de energía, como se mencionó anteriormente las frecuencias de los tres picos de energía en la salinidad coinciden con las frecuencias de los constituyentes de marea M_2 , K_1 y O_1 , sugiriendo su estrecha relación y en concordancia con lo presentado por Salas-Pérez *et al.* (2008), estudio donde encuentra que los principales armónicos de marea dentro del Sistema Arrecifal Veracruzano son los constituyentes K_1 , O_1 y M_2 . Por otro lado, la magnitud del viento presentó un pico de energía de un día (figura 16), el cual como ya se mencionó está asociado al efecto de las brisas costeras. Se realizaron espectros cruzados entre las salinidades en cada uno de los anclajes contra la magnitud del viento, con el fin de obtener la coherencia entre los picos de energía (figura 19), encontrando coherencia significativa en el periodo de un día, entre el viento y la salinidad en tres de los anclajes. El anclaje 3, no presentó coherencia significativa con el viento, probablemente se deba a la atenuación de esta señal de un día en la salinidad por el sitio donde se encontraba el instrumento.

En el análisis de baja frecuencia ($>36 \text{ h}$) se obtuvieron los espectros de potencia de las series de tiempo de salinidad en los cuatro anclajes, de las series de tiempo de la magnitud del viento y de la descarga del río (figuras 18), con el fin de encontrar en cuales frecuencias se presentaba energía espectral en las series y si existía semejanza entre estos picos de energía en las diferentes series. Al igual que en la alta frecuencia, se generaron espectros cruzados,

para ver la coherencia entre los espectros, primero se realizó entre las series de salinidad contra el viento, el cual presentaba picos de energía en 2, 5 y 6 días, los cuales eran semejantes a los que presentaba la salinidad, sin embargo el análisis de coherencia, no mostro ninguna coherencia entre la salinidad y la magnitud del viento a estas frecuencias (grafica no presentada en el trabajo). Posteriormente se realizó la correlación cruzada entre la salinidad y la descarga de río (figura 19a-d), donde se encontró coherencia significativa entre la salinidad y la descarga en las frecuencias de 6, 10-11, 16-18. En ANC1, para 10-11 días apenas y llega a ser significativa y para ANC4 solo se observó coherencia en los días de 10-11, posiblemente se deba a la batimetría de la zona. Sobre el aumento de energía en el espectro de la descarga, se encontró un estudio sobre caracterización fluvial e hidráulica de las inundaciones de México (Fuentes-Mariles, 2014), en la cuenca del río Jamapa, donde relacionan las variaciones de la descarga con la aparición de eventos meteorológico, utilizando hietogramas para varios periodos de años y espectros de potencia, encontrando aumentos de energía entre los día 4-10 y entre los días 14-22, en las estaciones de paso del toro y el tejlar, estos aumentos de energía coinciden con los picos presentados en nuestros espectro de potencia de descarga, sugiriendo que estas frecuencias están relacionadas a la frecuencia de los eventos meteorológicos.

Se realizó el cálculo de la energía teórica del gradiente salino, en cada uno de los sitios, se obtuvo que la energía teórica promedio anual fue más alta para el sitio 4 con $2,950.75 \text{ kWh}^{-1}$ y menor para el sitio1 con $2,228.93 \text{ kWh}^{-1}$, y los sitios 2 y 3 con $2,402.41 \text{ kWh}^{-1}$ y $2,480.92 \text{ kWh}^{-1}$, respectivamente. Separando en temporadas (secas/lluvias), se obtuvo para secas, valores de $1,598.60 \text{ kWh}^{-1}$ para el sitio 1, $1,971 \text{ kWh}^{-1}$ para el sitio 2, $2,435.28 \text{ kWh}^{-1}$ en el sitio3 y $3,938.30 \text{ kWh}^{-1}$ en el sitio 4, en la temporada de lluvias fue de $2,704.65$ para el sitio 1, el sitio 2 $2,745.41 \text{ kWh}^{-1}$ siendo este el que tiene la energía más alta en temporada de lluvias. El sitio 3 $2,507.65 \text{ kWh}^{-1}$ y el sitio 4 $1,991.33 \text{ kWh}^{-1}$. El sitio 3 es donde se encuentra la energía más estable a lo largo del año (2435.25 kWh^{-1} en secas y 2507.65 kWh^{-1} en lluvias kWh^{-1}); sin embargo a pesar de la disminución de energía que posee en temporada de lluvias el sitio 4, el promedio total anual de energía fue mayor que el obtenido en los otros 3 sitios. Tomando en cuenta esto podemos decir que la zona idónea

para la extracción de la energía del gradiente salino es el sitio 4, ya que como se mostró posee la mayor cantidad de energía promedio anual y también la mayor durante la temporada de secas. Para comparar la energía potencial que puede extraerse del río Jamapa, con los resultados obtenidos de la energía teórica anual promedio, se multiplicó el promedio anual para el sitio 4 (el mayor), por la descarga, lo que nos da un valor de 34,468,200.0 kWhaño⁻¹. La ciudad y puerto de Veracruz tiene un consumo anual de 75,183,907.0 kWhaño⁻¹, con un consumo per cápita de 130.68 kWh⁻¹. Por lo que si se ocupara toda la energía potencial del sitio 4 (100%) alcanzaría para cubrir el 45.84% de la demanda de la ciudad de Veracruz, y si solo se ocupa el 20% de la descarga, se podría cubrir el 9.16% de la demanda de la ciudad.

Por último, se debe considerar que, para extraer toda la energía potencial, los dispositivos ocupados para su extracción tendrían que contar con un 100% de eficiencia, actualmente el dispositivo RED reporta una eficiencia del 25%. Lo que disminuiría la energía neta que pudiese extraerse del sistema.

12. Conclusiones

- La descarga del río Jamapa, presenta dos temporadas (secas/lluvias). La descarga promedio anual para el año 2019 fue de $32.50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, por lo que se considera un año anómalo que estuvo 41% por debajo del promedio.
- La salinidad en el río Jamapa, muestra diferentes variaciones de acuerdo a las temporadas (lluvias y secas). Durante la temporada de secas hay un aumento de la salinidad en la parte profunda del estuario, debido a una mayor intrusión de la cuña salina. En la superficie del estuario el comportamiento de la salinidad es similar, con una mayor concentración de sales en la temporada de secas debido a la mezcla. En la temporada de lluvias las salinidades de fondo y superficie disminuyen.
- La variación de la temperatura a lo largo del año tanto en superficie como en fondo, está en función de las estaciones del año, con valores mayores en verano y menores en invierno.
- Los principales forzamientos de la salinidad en alta frecuencia dentro del estuario del río Jamapa son la marea (armónicos M2, K1 y O1) y el viento (1 día).
- El principal forzamiento de la salinidad en baja frecuencia dentro del estuario del río Jamapa es la descarga del río (6, 10-11, 16-18 días).
- El sitio que presentó el valor del promedio anual de energía potencial teórica más alto fue el sitio 4 con $2,950.0 \text{ KWh}^{-1}$, considerándose como el óptimo para obtención de energía gradiente.
- Existe una clara diferencia de la variabilidad del potencial de energía teórica disponible entre la temporada de secas y lluvias, siendo más alta la variabilidad durante la temporada de lluvias, debido al aumento en la descarga.
- El total de la energía potencial teórica anual del río Jamapa, alcanzaría para cubrir el 45.84% de la demanda anual de la ciudad de Veracruz.

13. Bibliografía citada

- Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2012). Comparisons of technical and economic performance of the main desalination processes with and without renewable energy coupling (No. NREL/CP-5900-54735). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Allende-Arandía, M. E., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Vargas-Hernández, J. M., & Zamudio, L. (2016). Analysis of ocean current observations in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico: 2007–12. *Journal of Coastal Research*, 32(1), 46-55.
- Altaee, A., & Sharif, A. (2015). Pressure retarded osmosis: Advancement in the process applications for power generation and desalination. *Desalination*, 356, 31-46.
- Álvarez-Silva, O. A., Osorio, A. F., & Winter, C. (2016). Practical global salinity gradient energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1387-1395.
- Álvarez-Silva, O., Winter, C., & Osorio, A. F. (2014). Salinity gradient energy at river mouths. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(10), 410-415.
- Aubrey, D. G., & Speer, P. E. (1984). Updrift migration of tidal inlets. *The Journal of Geology*, 92(5), 531-545.
- Badii, M., Guillen, A., & Abreu, J. (2016). Renewable Energies and Energy Conservation. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 15.
- Bravo Cabrera, J. L., Azpra Romero, E., Zarraluqui Such, V. C., Gay García, C., & Estrada Porrúa, F. (2010). Significance tests for the relationship between “El Niño” phenomenon and precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 49(4), 245–261. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2010.49.4.132>
- Calamita, E., Siviglia, A., Gettel, G. M., Franca, M. J., Winton, R. S., Teodoru, C. R., ... & Wehrli, B. (2021). Unaccounted CO2 leaks downstream of a large tropical hydroelectric reservoir. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(25), e2026004118.
- Cameron, W. M., & Pritchard, D. W. (1963). *Estuaries* In: MN Hill (editor): *The Sea* John Wiley and Sons. New York, 2, 306-324.
- Castells, X. E. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos.
- Cipollina, A., & Micale, G. (Eds.). (2016). *Sustainable energy from salinity gradients*. Woodhead Publishing.
- CONAGUA, (2019). *Comisión Nacional del Agua. Reporte del Clima en México*.
- CONAGUA, (2019). *Comisión Nacional del Agua. Reporte del Clima en México*.
- Cordero Acosta, J. R. (2021). Efectos del caudal en la posición de la cuña salina a lo largo de la desembocadura del Río Magdalena. Universidad Norte, Colombia.
- D'Adams, N., & Lukatelich, R. J. (1985). *Water Quality of the Murray River Estuary, Summary Report: Report to the Waterways Commission, Western Australia*. The Commission.

- Gobierno del Estado de Veracruz, (2017). Evaluación rápida del uso de Energía, Veracruz de Ignacio de la Llave, México.
- Fuentes-Mariles, O. A., Franco, V., Luna-Cruz, F., Vélez-Morales, L., & Morales-Rodríguez, H. L. (2014). Caracterización fluvial e hidráulica de las inundaciones en México convenio CNA-SGTGASIR-09/2014, organismo de cuenca X, Golfo centro ciudad de Veracruz, Veracruz ríos Jamapa y Cotaxtla. Comisión Nacional del Agua e Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Geyer, W. R., & Ralston, D. K. (2011). 2.03—The dynamics of strongly stratified estuaries. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Amsterdam: Elsevier, 37-52.
- Gonzalez-Vazquez, J. A., Hernández-Vivar, E., Rojas-Serna, C., & Valle-Morales, J. D. (2019). Diagnosis of water circulation in an estuary: A case study of the Jamapa River and the Mandinga lagoons, Veracruz, México. *Ciencias marinas*, 45(1), 1-16.
- Narváez, H., Bustamante Barrera, I., & Combatt, E. (2014). Estimación de la salinidad en suelos del delta del río Sinú en Colombia, mediante modelos de regresión lineal múltiple. *Idesia (Arica)*, 32(3), 81-90.
- Enríquez, C., Chiappa-Carrara, X., Roldán, M., & Marín-Coria, E. (2017). Perspectivas sobre el aprovechamiento energético de los gradientes salinos en las costas mexicanas. Recuperado de <http://www.amp.org.mx/inicio> E, 2.
- Haralambidou, K., Sylaios, G., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean microtidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90(4), 174-184.
- HydroQuebec. (2015). A renewable energy option: Osmotic Power.
- Holtzman, S., & Schreiberman, M. P. (1975). The effect of altering the ambient salinity of the freshwater teleost *Xiphophorus maculatus* on the histophysiology of its prolactin cells: I. Progressive changes in one-third sea water. *General and Comparative Endocrinology*, 25(4), 447-455.
- Ibáñez, Carles & Caiola, Nuno & Nebra, Alfonso & M, Wessels. (2009). 1130 Estuarios. En: V.V. A.A., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- INECC, (2017). Plan de acción de manejo Integral (PAMIC), Cuenca del río Jamapa, C6 Cuencas costeras
- Jia, Z., Wang, B., Song, S., & Fan, Y. (2014). Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 91-100
- Lankford, R. R. (1977). Coastal lagoons of México their origin and classification. In *Estuarine processes* (pp. 182-215). Academic Press.
- Lara-Domínguez, A. L., Contreras-Espinosa, F., Castañeda-López, O., Barba-Macías, E., & Pérez-Hernández, M. A. (2011). Lagunas costeras y estuarios. La biodiversidad en Veracruz: Estudio de caso. Comisión para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana (UV), Instituto de Ecología AC (INECOL), 301-317.
- Liaño-Carrera, F., Camarena-Luhrs, T., Gómez-Barrero, A., Martos-Fernández, F. J., Ramírez-Macias, J. I., & Salas-Monreal, D. (2019). New coral reef structures in a tropical coral reef system. *Latin american journal of aquatic research*, 47(2), 270-281.

- Logan, B. E., & Elimelech, M. (2012). Membrane-based processes for sustainable power generation using water. *Nature*, 488(7411), 313-319.
- Lomónaco, P. (1999). Propagación de la onda de marea en estuarios someros (Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria).
- MacCready, P., Banas, N. S., Hickey, B. M., Dever, E. P., & Liu, Y. (2009). A model study of tide-and wind-induced mixing in the Columbia River Estuary and plume. *Continental Shelf Research*, 29(1), 278-291.
- Magdaleno Mas, F. (2011). Evolución hidrogeomorfológica del sector central del río Ebro a lo largo del siglo XX: implicaciones ecológicas para su restauración (Doctoral dissertation, Montes). Universidad Politécnica de Madrid
- Marín Coria, E.J., M. Roldán Carvajal, C. Sánchez Sáenz, C. Enríquez, A. Félix Delgado, R. Silva Casarín, y E. Mendoza Baldwin 2020. *Energía del Océano. Energía del Gradiente Salino*. CEMIE-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 57 p.
- Mateos-Jasso, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., & Allende-Arandía, M. E. (2012). Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico. *Continental Shelf Research*, 50, 30-40.
- Osorio, M. E. (2015). Estudio de la intensificación de los vientos en el puerto de Veracruz mediante modelación numérica (Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional de México. Centro de Ciencias Atmosféricas).
- Oviedo-Salazar, J. L., Badii, M. H., Guillen, A., & Serrato, O. L. (2015). Historia y uso de energías renovables history and use of renewable energies. *Daena Int. J. Good Conscience*, 10(1), 1-18
- Pattle, R. E. (1954). Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile. *Nature*, 174(4431), 660-660.
- Paerl, H. W., Valdes, L. M., Joyner, A. R., Peierls, B. L., Piehler, M. F., Riggs, S. R., ... & Luettich, R. A. (2006). Ecological response to hurricane events in the Pamlico Sound system, North Carolina, and implications for assessment and management in a regime of increased frequency. *Estuaries and Coasts*, 29(6), 1033-1045.
- Pereyra, D., Pérez, J., & Salas, R. (2010). Hidrología. Florescano, E., y Ortíz, J., coords. Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. Zona Costera. México. Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana, 1- 280.
- Pereyra Díaz D., Pérez Sesma J.A.A., (2006), Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz. En Tejeda Martínez, A., & Welsh Rodríguez, C. Coords. Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz.
- Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J.A.A. y Salas Ortega, M.R. (2010). Hidrología en Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. Gobierno del estado de Veracruz. México. Recuperado de <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/9650>
- Perales-Valdivia, H., Sanay-González, R., & Valle-Levinson, A. (2018). Effects of tides, wind and river discharge on the salt intrusion in a microtidal tropical estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 24, 400-410.
- Pattle, R. E. (1954). Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile. *Nature*, 174(4431), 660-660.

- Payares, N. B., Mavo, G. M., Arena, M., Ferronato, C., Lekanda, A., Vitale, A. J., & Perillo, G. (2018) Características Hidrodinámicas de un Meandro en un Canal de marea del estuario de Bahía Blanca, Argentina. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Riverón-Enzástiga, M. L. (2008). Análisis de la variabilidad de las descargas de agua de los principales ríos de la cuenca del Golfo de México. Bachelor Tesis, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 98.
- Romero Centeno, R., y Zavala Hidalgo, J. (Eds.) (2021). Meteorología. En S. Z. Herzka, R. A. Zaragoza Álvarez, E. M. Peters y G. Hernández Cárdenas. (Coord. Gral.). Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo I), México: Consorcio de Investigación del Golfo de México.
- Salas-Monreal, D., Riveron-Enzastiga, M. L., de Jesus Salas-Perez, J., Bernal-Ramirez, R., Marin-Hernandez, M., & Granados-Barba, A. (2020). Bathymetric flow rectification in a tropical micro-tidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235, 106562.
- Salas-Monreal, D., Díaz-Hernández, A., Áke-Castillo, J. A., Granados-Barba, A., & Riverón-Enzástiga, M. L. Variación anual de los parámetros hidrográficos en la confluencia del río Jamapa y arroyo Moreno (México): hidrografía del río Jamapa. *Intropica*, 59-65.
- Salas-Pérez, J. D. J., Salas-Monreal, D., Arenas-Fuentes, V. E., Salas-de-León, D. A., & Riveron-Enzástiga, M. L. (2008). Tidal characteristics in a coral reef system from the western Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 34(4), 467-478 Secretaría de Energía (2012). Balance Nacional de Energía 2012. México
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Atlas geográfico del medio ambiente y recursos naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Edición 2010.
- Sierra, J. P., Sánchez-Arcilla, A., Del Río, J. G., Flos, J., Movellán, E., Mössö, C., ... & Romero, I. (2002). Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Research*, 22(2), 361-378.
- Sapiña, F., & Navarro, F. S. (2006). El reto energético: Gestionando el legado de Prometeo (Vol. 6). Universitat de València.
- Skilhagen, S. E., Dugstad, J. E., & Aaberg, R. J. (2008). Osmotic power—power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients. *Desalination*, 220(1-3), 476-482.
- Tomczak, M. (2000). An introduction to online physical oceanography. Oceanography Society.
- Touati, E. K., Tadeo, F., Kim, J. H., Silva, O. A. A., & Chae, S. H. (Eds.). (2017). Pressure retarded osmosis: renewable energy generation and recovery. Academic Press.
- Roldán Vilorio, J. (2013). Energías renovables. Lo que hay que saber. Ediciones Paraninfo, SA.
- Valle-Levinson, A. (Ed.). (2010). Contemporary issues in estuarine physics. Cambridge University Press.
- Wick, G. L., & GL, W. (1977). Prospects for renewable energy from the sea. *Mar. Technol. Soc. J.*, 11, 16-21.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., & O'Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12).

Zhang, E., Gao, S., Savenije, H. H., Si, C., & Cao, S. (2019). Saline water intrusion in relation to strong winds during winter cold outbreaks: North Branch of the Yangtze Estuary. *Journal of Hydrology*, 574, 1099-1109.

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”

www.uv.mx

