



Tarea Surgencia

Dinámica del Océano

Valentina Iturra Rosales
Profesor Oscar Pizarro Arriagada
Ayudante Danae Sepúlveda Martínez
Fecha de entrega: 13 de julio de 2024
Concepción, Chile

Índice de Contenidos

1. A partir de los datos de velocidad del viento en el archivo VientosCosteros.mat	2
1.1. Calcule las series de tiempo del transporte de Ekman hacia fuera de la costa	2
1.2. Discuta el valor de $C_D = 1.3 \cdot 10^{-3}$ en relación con la Figura 9.14 del libro de Pond & Pickard (1983). Compare que tan sensible es el cálculo del esfuerzo de viento cuando se usa un C_d variable y vientos de 2, 5, 10, 15, 20 y 25 m/s. Discuta sus resultados. .	3
1.3. Grafique las series de Transporte de Ekman en las 3 localidades y analice los resultados en el marco de la variabilidad sinóptica de la surgencia comparando las tres localidades.	4
2. Calcule el ciclo anual del transporte de Ekman	7
2.1. Promediando todos los valores mensuales, grafique el ciclo anual y analice la figura en términos de la variabilidad anual de las diferentes latitudes.	7
3. Cálculos	8
3.1. Calcule las series de velocidades verticales en cada localidad (en m/día). Grafique un histograma mostrando los porcentajes de velocidades verticales que caen en los intervalos entre -5 m/día y 10 m/día, para las distintas estaciones del año.	8
3.2. Interprete y compare los resultados en términos de intensidad y variación anual (invierno verano) de la surgencia en las tres localidades. Complemente su interpretación con estudios sobre el ciclo anual de la surgencia en Chile y/u otras regiones	9
4. Considere la serie de 37°S durante el verano del año 2000	11
4.1. Grafique la serie de tiempo del esfuerzo del viento paralelo a la costa durante el periodo. Describa los eventos de surgencia en este periodo: duración del evento, intensidad promedio y máxima del esfuerzo de viento durante el evento de surgencia. Compare la magnitud promedio de τ_y durante los eventos con la magnitud promedio de τ_y del verano de 2000 (enero a marzo).	11
4.2. Calcule el impulso I del viento para los eventos del 7 al 11 de enero de 2000 y del 13 al 27 de enero de 2020.	13
4.3. Construya histogramas de duración e intensidad de los eventos de surgencia en 37°S. Para definir el límite de los eventos, elija de acuerdo a algún criterio un valor umbral, bajo el cual comienza y/o termina el evento de surgencia.	14
5. Anexo	15
5.1. Transporte zonal de Ekman	15
5.2. Sensibilidad al coeficiente de arrastre	16
5.3. Ciclo anual transporte de Ekman	17
5.4. Velocidades verticales por estación	17
5.5. Esfuerzo del viento	18
5.6. Impulso del viento	19
5.7. Chorro costero	19
5.8. Gráficas duración e intensidad	20

1. A partir de los datos de velocidad del viento en el archivo **VientosCosteros.mat**

1.1. Calcule las series de tiempo del transporte de Ekman hacia fuera de la costa

Para determinar el transporte hacia fuera de la costa se debe utilizar la ecuación:

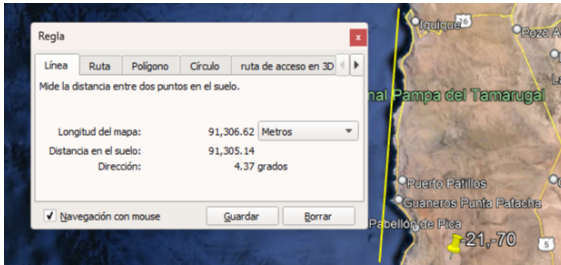
$$M_x = \frac{\tau_y}{\rho_{agua} \cdot f} \quad (1.1)$$

Como se puede observar, es necesario obtener el esfuerzo del viento, específicamente en la componente meridional, ya que es esta la que genera un transporte zonal. Este esfuerzo se puede determinar mediante la ecuación:

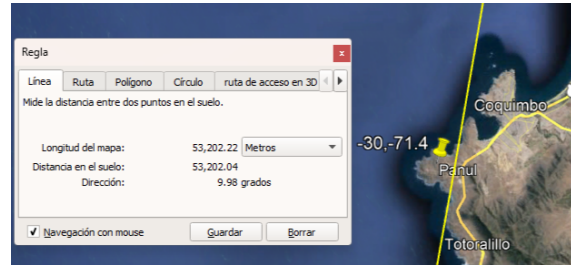
$$\tau_y = \rho_{aire} \cdot C_d \cdot |W|W \quad (1.2)$$

Para resolver el problema, se utilizaron los siguientes parámetros: la densidad del agua de $\rho_{agua} = 1025 \frac{kg}{m^3}$, el parámetro de Coriolis dada por $f = 2\Omega \sin \phi$ donde $\Omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \frac{1}{s}$, el coeficiente de arrastre de $C_d = 1.3 \cdot 10^{-3}$, y la densidad del aire de $\rho_{aire} = 1.2 \frac{kg}{m^3}$. La magnitud del vector de viento se denota como $|W|$, mientras que la componente meridional de este vector se representa como W .

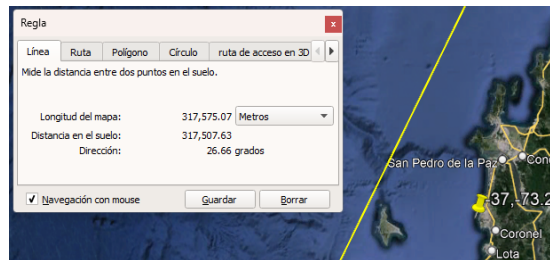
Para realizar este cálculo, es necesario rotar los vectores de viento de manera que se pueda determinar la componente a lo largo de la costa. Para ello, primero se identifican los vectores que están orientados hacia el sur y se les aplica una rotación de 180° . Después de esto, se resta la inclinación de la costa, de modo que la dirección del vector de viento sea relativa a la orientación de la costa.



(a) Región de Tarapacá



(b) Región de Coquimbo



(c) Región de Biobío

Figura 1.1: Inclinación de la costa con respecto al norte, determinada utilizando Google Earth.

La inclinación de la costa se obtuvo mediante Google Earth y los resultados se presentan en las Figuras (1.1 a, b y c) para cada latitud distinta. Todo lo mencionado anteriormente se realizó utilizando el código (1) indicado en el anexo.

1.2. Discuta el valor de $C_D = 1.3 \cdot 10^{-3}$ en relación con la Figura 9.14 del libro de Pond & Pickard (1983). Compare que tan sensible es el cálculo del esfuerzo de viento cuando se usa un C_d variable y vientos de 2, 5, 10, 15, 20 y 25 m/s. Discuta sus resultados.

Observando la Figura (1.2), se presenta una gráfica del coeficiente de arrastre en función de la velocidad del viento. Esta gráfica tiene una forma similar a una función escalonada: para velocidades de viento inferiores a 5 [m/s], se utiliza un C_D inferior a $1e-3$, mientras que para velocidades superiores a 10 [m/s], se debería utilizar aproximadamente $2.5e-3$.

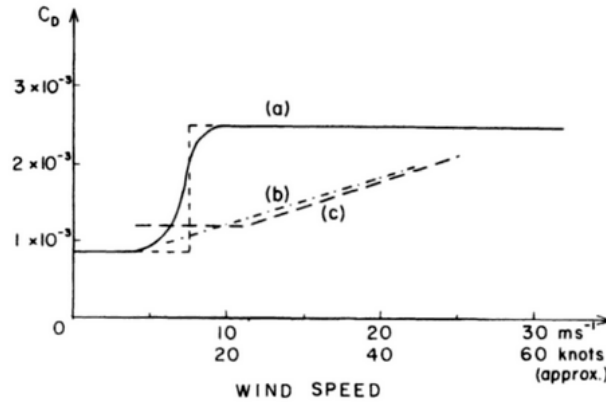


Figura 1.2: Coeficiente de arrastre del viento sobre el agua en función de la velocidad del viento. Extraído de [1].

Sin embargo, mediciones empíricas sugieren que para velocidades de hasta 15 [m/s] es más útil utilizar un C_D entre $1.3e-3$ y $1.5e-3$ [1]. En el caso de las latitudes estudiadas, los valores máximos de velocidad del viento para cada latitud se muestran en la Tabla (1.1), indicando que estas velocidades se mantienen por debajo de los 20 [m/s]. Por esta razón, se estima y se sugiere la utilización del valor mencionado.

21°S	30°S	37°S
19.9 [m/s]	16.3 [m/s]	8.4 [m/s]

Tabla 1.1: Velocidades máximas de viento en tres latitudes distintas.

Por otro lado, para evaluar la sensibilidad del esfuerzo del viento ante variaciones en el coeficiente C_D , se analiza la Figura (1.3).

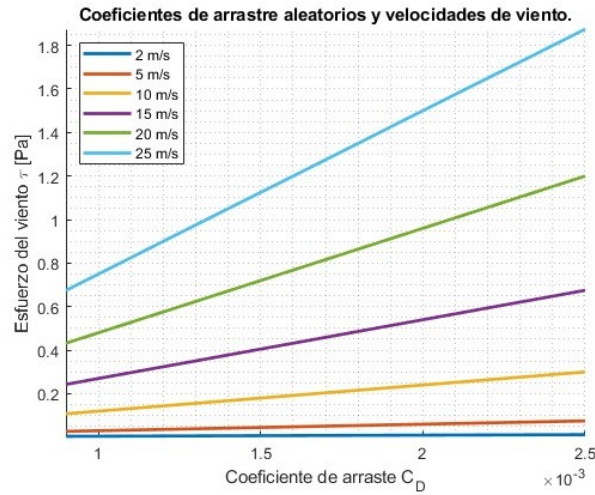


Figura 1.3: Gráfico que ilustra la sensibilidad del esfuerzo del viento frente a variaciones en el coeficiente de arrastre (C_D).

La Figura (1.3), generada mediante el código (2) detallado en el anexo, muestra la variación del coeficiente C_D en un rango de $0.9e-3$ a $2.5e-3$, valores extraídos de la Figura (1.2). Se determinó el esfuerzo del viento para cada velocidad, variando el coeficiente de arrastre. Se observa que en velocidades de viento más bajas, entre 2 y 5 m/s, el esfuerzo del viento no es tan sensible a los cambios en el coeficiente de arrastre. Sin embargo, a medida que la velocidad del viento aumenta, alcanzando hasta 25 m/s, la sensibilidad incrementa notablemente, como se evidencia por la pendiente creciente de la curva.

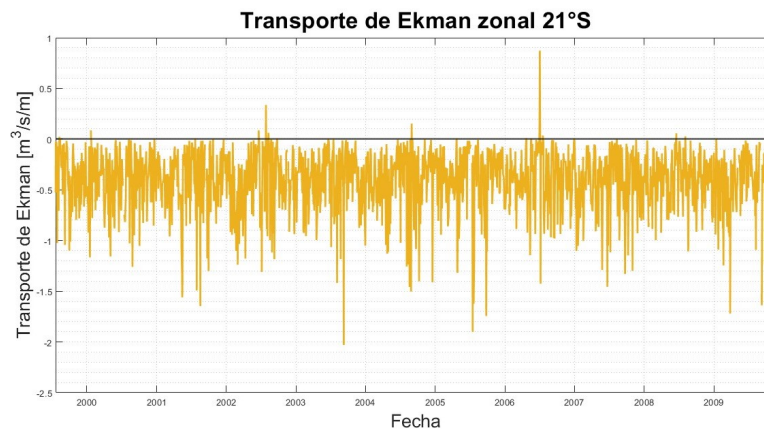
1.3. Grafique las series de Transporte de Ekman en las 3 localidades y analice los resultados en el marco de la variabilidad sinóptica de la surgencia comparando las tres localidades.

Al graficar el transporte de Ekman en las tres localidades, se puede observar una clara diferencia entre ellas, como se muestra en la Figura (1.4). Considerando un estudio costero de Chile, se identifican tres regiones: Tarapacá a 21°S , Coquimbo a 30°S y Biobío a 37°S . Se observa que la latitud más cercana al ecuador (21°S) presenta un transporte con una magnitud mucho menor en comparación con las otras, pero es mayoritariamente negativo. En contraste, las latitudes más altas (30°S y 37°S) también presentan un transporte predominantemente negativo, lo que implica un movimiento hacia el oeste. Sin embargo, estas últimas tienen un transporte de mayor magnitud y muestran una mayor variación, con algunos valores positivos.

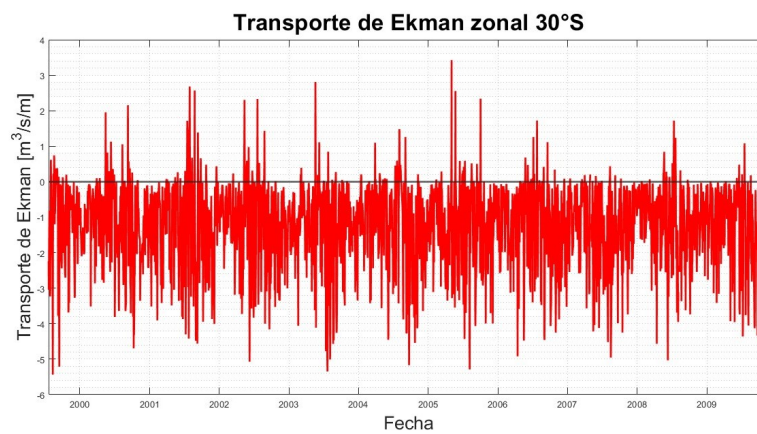
Este fenómeno de transporte hacia el oeste crea un ambiente propicio para la surgencia de aguas intermedias, frías y ricas en nutrientes. La orientación del viento puede explicar estas diferencias. En la región de 21°S , el viento tiene más constantemente un sentido hacia el norte, generando un transporte hacia el oeste en el hemisferio sur. En las latitudes más altas, es probable que haya variaciones en el sentido del viento meridional, provocando las diferencias observadas.

En cuanto a las latitudes 30°S y 37°S , se puede observar en las Figuras (1.4 b y c) que el rango de valores del transporte es bastante similar. Sin embargo, en 37°S , la oscilación está mucho más definida, probablemente debido al cambio estacional, mientras que en 30°S no se percibe una

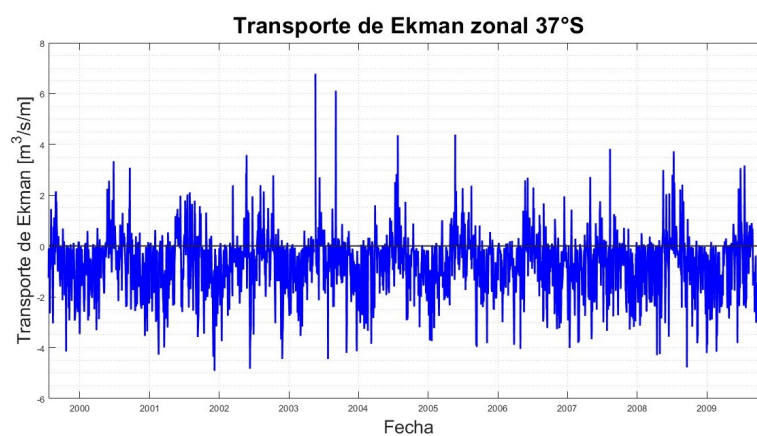
variación estrictamente anual, sino algo más irregular.



(a) Región de Tarapacá



(b) Región de Coquimbo



(c) Región de Biobío

Figura 1.4: Serie de tiempo del transporte de Ekman horizontal, medido durante aproximadamente 10 años en tres diferentes latitudes.

En relación con la variabilidad, en la latitud 21°S se observa que el transporte presenta valores frecuentemente comprendidos entre $0.25 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$ y $0.3 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$ hacia el oeste durante el período de diez años analizado, según se muestra en la Figura (1.5a). Dado que el transporte en esta zona puede alcanzar hasta una magnitud de $2 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$ en esa misma dirección, la diferencia entre estos valores proporciona un rango aproximado de $1.7 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$.

En contraste, en la latitud 30°S , la mayoría de los valores se concentran alrededor de $0.2 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$ hacia el oeste, como se evidencia en la Figura (1.5). Si consideramos que los valores máximos en dirección oeste alcanzan aproximadamente $5.5 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$, siguiendo el mismo procedimiento, el rango es de aproximadamente $5.3 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$.

Finalmente, en la latitud 37°S , el transporte se concentra mayormente hasta $0.2 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$ hacia el oeste, como se observa en la Figura (1.5). Aunque esta latitud muestra los valores más altos en dirección positiva, hacia el oeste el valor máximo es de $6 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$, por lo que el rango total es de aproximadamente $5.8 \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \right]$.

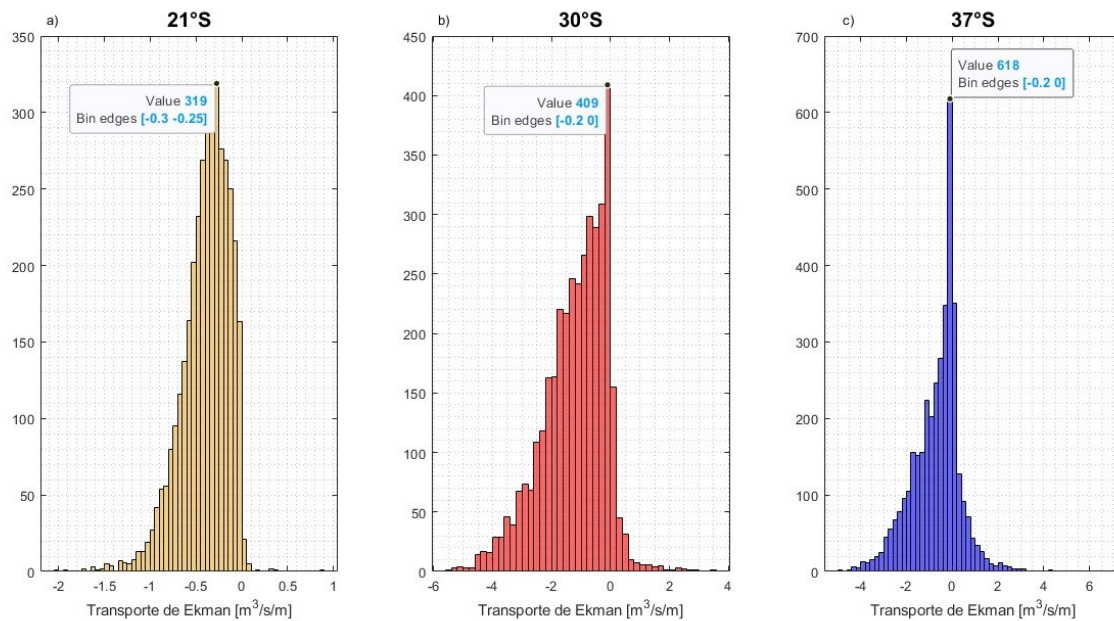


Figura 1.5: Gráfico de barras que muestra el transporte de Ekman y sus rangos de valores más repetidos en tres latitudes diferentes: a) 21°S , b) 30°S , y c) 37°S .

Por consiguiente, se puede concluir que en 37°S , debido a un mayor rango, existe una mayor dispersión de datos, lo que indica una mayor variabilidad en el transporte, alcanzando valores muy grandes. Esto podría interpretarse como consecuencia de una mayor susceptibilidad a eventos climáticos importantes que provocan velocidades extremas de viento y, por ende, un transporte significativo de Ekman. En contraste, en la zona más al norte de Chile, representada por 21°S , se observa una baja dispersión de datos de transporte de Ekman. Esto sugiere una variabilidad menor en el movimiento de aguas hacia fuera de la costa, probablemente debido a que los vientos se mantienen mayormente constantes en esa área.

2. Calcule el ciclo anual del transporte de Ekman

2.1. Promediando todos los valores mensuales, grafique el ciclo anual y analice la figura en términos de la variabilidad anual de las diferentes latitudes.

Utilizando el código (3) proporcionado en el anexo, se ha generado la Figura (2.1) que representa el ciclo anual del transporte de Ekman. Este transporte perpendicular a la costa funciona como un indicador crucial de la surgencia en el hemisferio sur: a menor valor (o más negativo), mayor es la surgencia en la región.

Se observa claramente que la surgencia en 21°S es significativamente menor que en las otras latitudes. Aunque en 37°S existen períodos con valores muy bajos de surgencia, en 21°S el transporte se mantiene constantemente en un rango aproximado de $-0.3 \left[\frac{m^3/s}{m} \right]$ a $-0.5 \left[\frac{m^3/s}{m} \right]$, lo cual confirma lo mencionado en la sección 1.3 del informe.

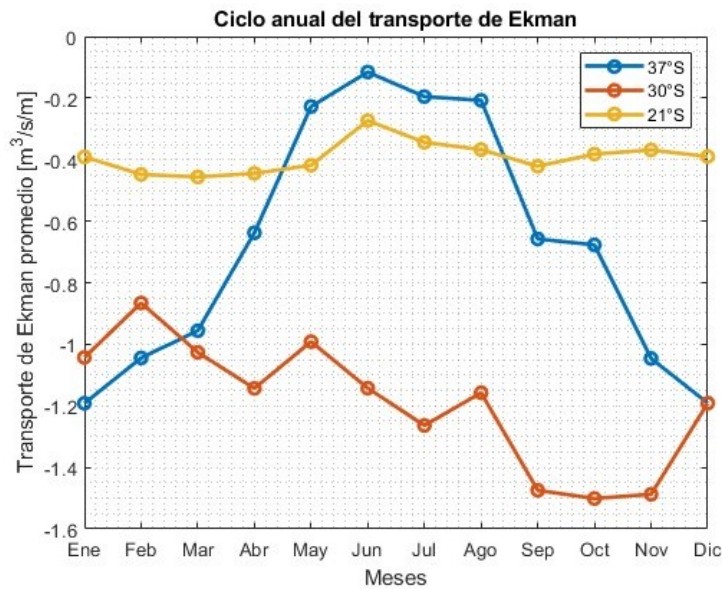


Figura 2.1: Promedio anual del transporte de Ekman zonal en tres distintas latitudes

Además, se nota que en 37°S, durante los meses de verano del hemisferio sur, la surgencia alcanza su máximo. Por el contrario, en invierno los valores de transporte son mayores, siendo junio el mes con el máximo y, por lo tanto, menor surgencia. Esto respalda la tendencia estacional descrita en la sección 1.3 para esta región.

En contraste, en 30°S no se observa una tendencia estacional tan marcada; más bien se observa una disminución progresiva con algunas fluctuaciones en el transporte en esta región.

Para entender estas diferencias, es fundamental considerar la influencia del anticiclón del Pacífico Sur en estos procesos. En invierno, este anticiclón se desplaza hacia latitudes menores, mientras que en verano se mueve hacia el sur. Durante el verano, cuando el anticiclón está más al sur, se

registran valores máximos de surgencia en 37°S, indicando que los vientos podrían llegar componente meridional que resalta en esta zona durante ese período.

En cambio, en 30°S podría haber una zona de transición del anticiclón, es decir se reciben vientos menos paralelos a la costa durante el verano, y a medida que la alta presión se desplaza hacia el norte en invierno, los vientos se rotan verticalmente, alcanzando su máximo de surgencia entre septiembre y noviembre.

Esta dinámica también podría estar influyendo en 21°S, donde se observa una disminución de la surgencia en el mes de junio, posiblemente debido al ascenso del anticiclón. Sin embargo, esta región puede estar experimentando velocidades de viento más bajas o componentes de viento menos meridionales, lo que contribuye a una surgencia en promedio menor en comparación con otras latitudes.

3. Cálculos

Considere que el transporte hacia fuera de la costa tiene lugar en una capa superficial de profundidad $h_E = 20 [m]$ y que este transporte es compensado por un transporte vertical en una distancia L desde la costa. La distancia L puede ser relacionada con el radio de deformación interno de Rossby dado por $L_R = c_i/f$, donde c_i es la velocidad de fase de una onda larga interna de gravedad. Use $c_i = 2.5 [m/s]$ y f correspondiente a la latitud dada en cada caso.

3.1. Calcule las series de velocidades verticales en cada localidad (en m/día). Grafique un histograma mostrando los porcentajes de velocidades verticales que caen en los intervalos entre -5 m/día y 10 m/día, para las distintas estaciones del año.

Mediante el código (4) se generaron las Figuras (3.1), (3.2) y (3.3) que muestran los porcentajes de velocidades verticales en metro por día en una capa superficial de 20 metros.

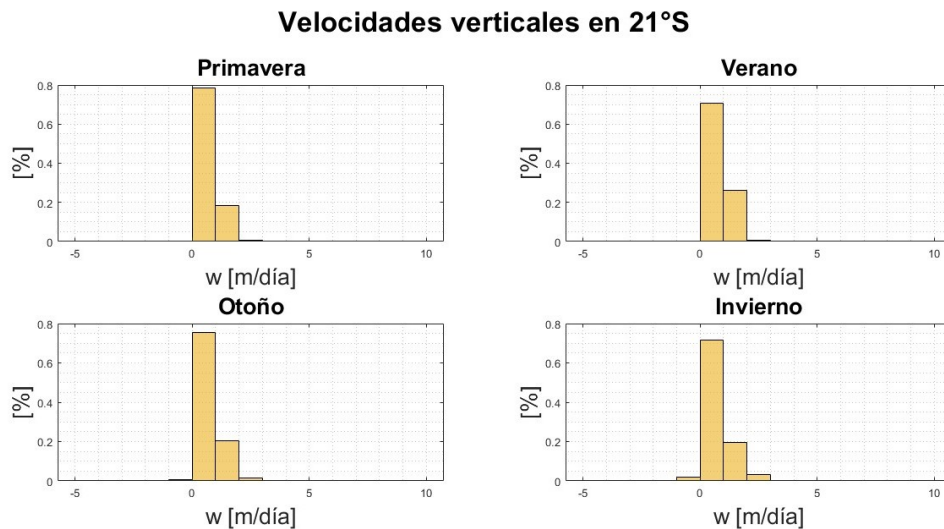


Figura 3.1: Variación estacional de la velocidad vertical “w” en la latitud 21°S.

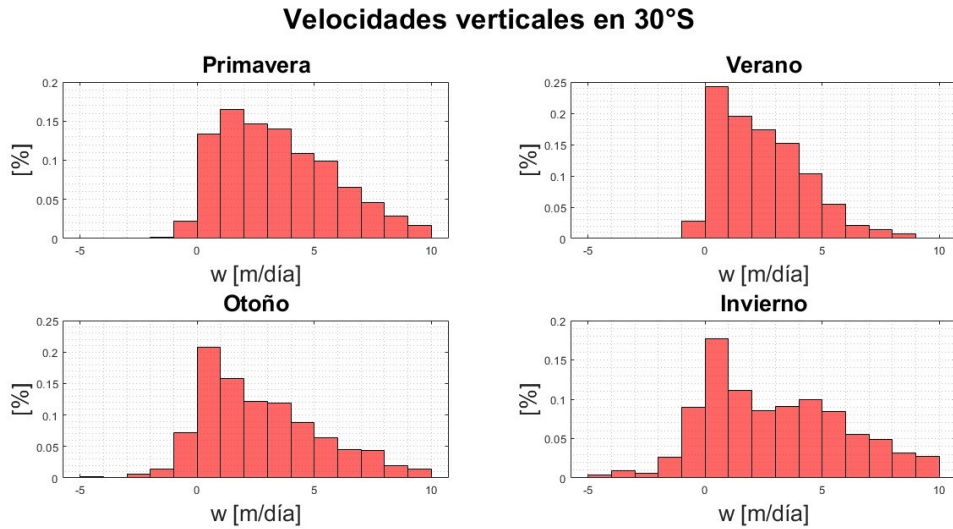


Figura 3.2: Variación estacional de la velocidad vertical “w” en la latitud 30°S.

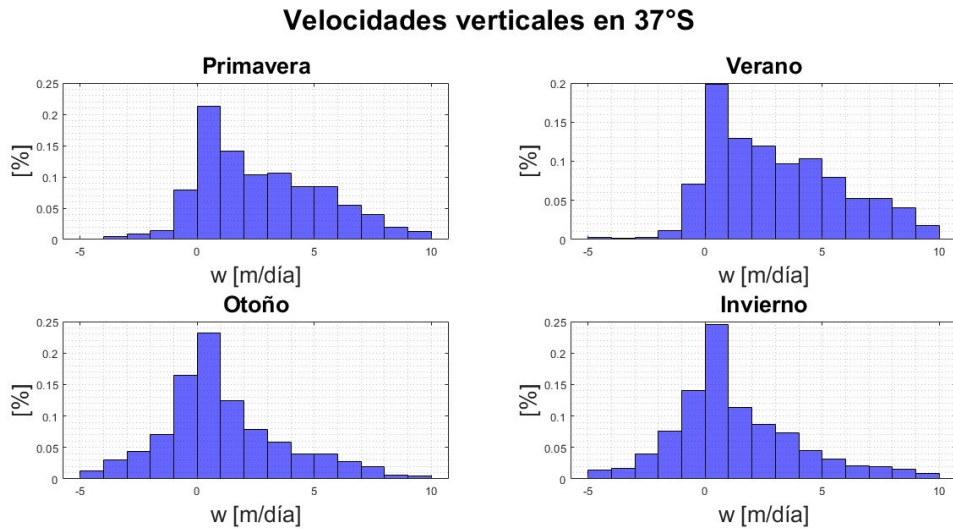


Figura 3.3: Variación estacional de la velocidad vertical “w” en la latitud 37°S.

3.2. Interprete y compare los resultados en términos de intensidad y variación anual (invierno verano) de la surgencia en las tres localidades. Complemente su interpretación con estudios sobre el ciclo anual de la surgencia en Chile y/u otras regiones

Es importante destacar que en las Figuras mostradas anteriormente, las velocidades verticales se obtuvieron mediante la ecuación (3.1). Estas se determinan de esta forma porque cumplen una función de compensación para el agua desplazada hacia fuera de la costa por el transporte de Ekman,

representado por M_x . Así, cuanto mayor sea el transporte, mayor será la surgencia necesaria para reemplazar el agua desplazada.

$$w = \frac{M_x}{L_R} \quad (3.1)$$

A diferencia del transporte de Ekman, el radio de Rossby L_R tiene una relación inversamente proporcional con la velocidad vertical. Esto se puede observar en la misma ecuación, donde el radio de Rossby representa la región de surgencia, es decir, la distancia entre la costa y el punto donde comienza el transporte. El hecho de que estas variables sean inversamente proporcionales implica que, a medida que esta distancia aumenta, la velocidad vertical disminuye y, en consecuencia, la surgencia es menor.

Con estos antecedentes, se puede interpretar la Figura (3.1), que representa la latitud 21°S, correspondiente a la región de Tarapacá. En general, no hay mucha variabilidad en la velocidad, ya que en promedio el rango se encuentra entre $-1 [m/día]$ y $3 [m/día]$.

Si analizamos las diferencias entre invierno (considerando las estaciones de invierno y otoño) y verano (incluyendo también la primavera), notamos que en verano las velocidades verticales son estrictamente positivas, indicando la presencia de surgencia. Sin embargo, entre el 70 % y 80 % de las velocidades se encuentran entre $0 [m/día]$ y $1 [m/día]$, lo que indica una surgencia muy lenta. Esto concuerda con el hecho de que el radio de Rossby en esta región es de aproximadamente $48 [km]$, el mayor entre las demás latitudes, lo que reduce la magnitud de la surgencia en esta zona.

Por otra parte, al observar las gráficas de invierno, notamos una mínima tendencia hacia velocidades negativas, que representan aproximadamente el 5 %. Esto sugiere la posibilidad de fenómenos atmosféricos que generen viento norte en esta época, lo que podría causar sumergencia en algún periodo del invierno. Sin embargo, comparado con las velocidades positivas, estas últimas representan aproximadamente el 95 %, lo que sugiere que las condiciones de surgencia predominan incluso en invierno.

En una mirada general de ambas épocas del año, se puede concluir que no hay una variabilidad significativa entre ambas, ya que la variación máxima es del 10 %. Es importante resaltar de este análisis que las velocidades durante todo el año son bajas, lo cual concuerda con la baja surgencia mencionada en la sección 2.1 y con la latitud en la que se encuentra la región.

En cuanto a las velocidades verticales en 30°S, observadas en la Figura (3.2), podemos notar que hay una mayor variación de velocidades en comparación con la latitud anterior. Específicamente, en la época de verano, se observa una tendencia hacia velocidades positivas, con aproximadamente el 25 % de los valores entre $0 [m/día]$ y $1 [m/día]$, esto corresponde a un cuarto de las velocidades. Sin embargo, cerca de tres cuartos son superiores, alcanzando valores máximos de hasta $9 [m/día]$, que representa el 1 % de los datos.

En contraste, durante la temporada invernal, se observa que en otoño e invierno las velocidades negativas se hacen presentes, indicando una tendencia, aunque pequeña, de sumergencia, pero mayor con respecto al caso anterior. Además, la velocidad máxima en invierno alcanza hasta $10 [m/día]$, y el porcentaje que representa a estos valores es mucho mayor que en verano.

Por lo tanto, se puede concluir que, aunque durante todo el año la velocidad vertical es más probable que esté entre $0 [m/día]$ y $1 [m/día]$, en invierno esta velocidad puede variar más, tanto en términos del valor máximo alcanzado como de la cantidad de eventos de sumergencia. En verano, con un bajo porcentaje de sumergencia de alrededor del 3 %, la surgencia es más pronunciada, lo que se demuestra por el mayor porcentaje de velocidades positivas, lo que concuerda con lo mostrado en la Figura (2.1).

Por último, en la región del Biobío, ubicada en la latitud 37°S, cuyos datos estacionales se mues-

tran en la Figura (3.3), se observa claramente una disminución de surgencia en la época invernal. Notamos que, aunque el intervalo de 0 [m/día] a 1 [m/día] es mayor en invierno, alcanzando casi el 25 % en comparación con el 20 % en verano, es evidente que los valores mayores, de 1 [m/día] hasta 10 [m/día], tienen un porcentaje significativamente mayor en verano que en invierno. Esto se demuestra, por ejemplo, en el intervalo de 8 [m/día] a 9 [m/día] que alcanza un 4 % en verano, mientras que en invierno es menos del 2 %.

Además, se presentan valores negativos de velocidad en ambos periodos, lo que indica la ocurrencia de sumergencia. Sin embargo, el porcentaje es mayor en invierno, donde el intervalo de 0 [m/día] a -1 [m/día] representa alrededor del 15 %, mientras que en verano este intervalo no alcanza el 10 %.

Estas observaciones confirman lo mencionado en la sección 2.1 acerca de una mayor surgencia en verano y menor en invierno. También demuestran que en invierno la razón de la baja surgencia puede deberse a la aparición de viento norte en esa época, lo que produce un transporte hacia la costa y, por tanto, sumergencia en esta época del año. Además, recordando la ecuación (3.1), podemos señalar que los valores mayores de velocidad se deben al bajo radio de Rossby, ya que esta región está a una latitud más alta que en el primer análisis de 21°S. Los valores de velocidades verticales negativas se corresponden con un transporte de Ekman positivo, de modo que el exceso de agua en la costa en invierno debido a este transporte se compensa con la sumersión, como se muestra en la Figura analizada.

4. Considere la serie de 37°S durante el verano del año 2000

4.1. Grafique la serie de tiempo del esfuerzo del viento paralelo a la costa durante el periodo. Describa los eventos de surgencia en este periodo: duración del evento, intensidad promedio y máxima del esfuerzo de viento durante el evento de surgencia. Compare la magnitud promedio de τ_y durante los eventos con la magnitud promedio de τ_y del verano de 2000 (enero a marzo).

A partir de la Figura (4.1), realizada mediante el código (5) ubicado en el anexo, se puede observar la variación del esfuerzo del viento durante los meses de enero a marzo del año 2000 en la región del Biobío. Sabiendo que esta región se encuentra en el hemisferio sur (HS), debemos recordar que el esfuerzo del viento meridional τ_y en HS implica viento en dirección hacia el ecuador cuando este esfuerzo es positivo y en dirección opuesta cuando es negativo.

También recordamos que, según lo mencionado anteriormente, los eventos de surgencia en esta zona son generados cuando el viento sopla en dirección ecuatorial. Por lo tanto, con esta información, se procede a identificar los eventos de surgencia.

Se identifican cuatro eventos de surgencia, algunos de pocos días de duración y otros de casi un mes. El primer evento se extiende del 1 al 27 de enero de 2000. Aunque el esfuerzo del viento positivo es mínimo el 6 de enero, este día se considera igualmente parte del evento junto con los días previos. La intensidad promedio de este evento de 27 días se calcula como la media del esfuerzo del viento

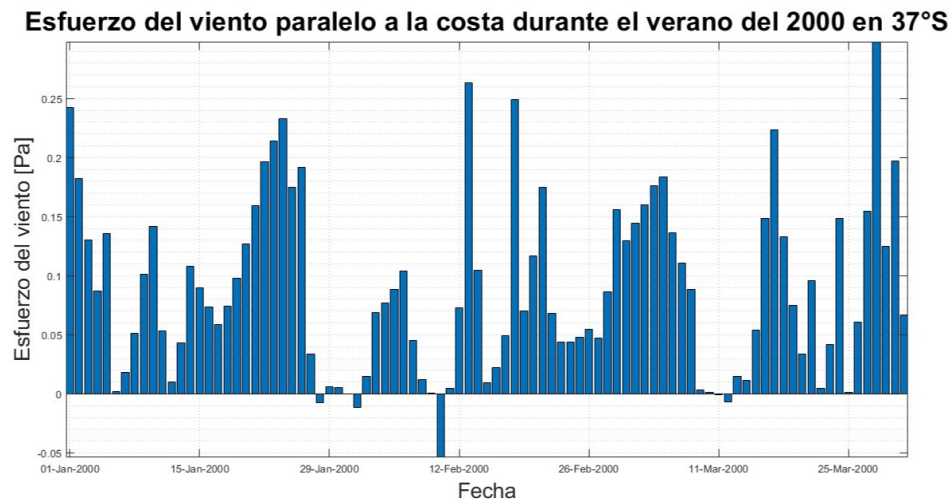


Figura 4.1: Serie temporal del esfuerzo meridional del viento durante el verano de 2020 en la región del Biobío a 37°S

durante estos días, y la intensidad máxima se registró el 1 de enero. Ambos valores se encuentran en la Tabla (4.1). El segundo evento, del 2 al 8 de febrero, dura solo siete días. La intensidad promedio y la máxima, que se registró el 6 de febrero, se encuentran en la tercera y cuarta columna de la Tabla (4.1), respectivamente. El tercer evento ocurre del 11 de febrero al 9 de marzo. La intensidad máxima se registró el 13 de febrero. Los valores de intensidad promedio y máxima se detallan en las columnas tres y cuatro de la Tabla (4.1). El último evento se extiende del 13 al 31 de marzo. La intensidad máxima se alcanzó el 28 de marzo, con los valores correspondientes en la cuarta columna de la Tabla (4.1). La intensidad promedio de este evento se encuentra en la tercera columna de la misma tabla.

Eventos	Duración [días]	Intensidad promedio [Pa]	Intensidad máxima [Pa]
1°	27	0.1123	0.2425
2°	7	0.0586	0.1041
3°	28	0.1007	0.2637
4°	19	0.0994	0.2981
Intensidad promedio durante el verano [Pa]:		0.0888	

Tabla 4.1: Características de los eventos de surgencia a 37°S durante el verano de 2020.

Al comparar la intensidad promedio a lo largo del verano, que se muestra en la Tabla (4.1), con los promedios de intensidad de cada evento, se destaca que el primer evento y los dos últimos exhiben un promedio superior al general. Es notable que estos eventos fueron bastante prolongados, por lo que se sugiere que la combinación de un promedio por encima de la media y períodos prolongados de esfuerzo positivo del viento es favorable para eventos de surgencia costera.

4.2. Calcule el impulso I del viento para los eventos del 7 al 11 de enero de 2000 y del 13 al 27 de enero de 2020.

Mediante la ecuación (4.1) donde D_i y D_f son los días inicial y final del evento, y considerando la densidad $\rho = 1025 [kg/m^3]$ y $H = 50 [m]$, se puede determinar que el impulso en cada evento está dado por los resultados que se presentan en la Tabla (4.2). Este cálculo se realizó utilizando el código (6) que se encuentra en el anexo.

$$I \approx \frac{1}{\rho H} \int_{D_i}^{D_f} \tau dt \quad (4.1)$$

	1 ^{er} Evento	2 ^{do} Evento
Impulso $[m/s]$	0.56	3.1

Tabla 4.2: Impulso del viento calculado para dos eventos ocurridos en enero de 2000

Ahora, el modelo de Csanady dice que la surgencia es completamente desarrollada si el impulso cumple que $I \geq \sqrt{g'H}$ y si en este caso consideramos que $\sqrt{g'H} = 2.5 [m/s]$ se cumplirá entonces que el segundo evento contara con una surgencia completamente desarrollada mientras que el primer evento tendrá un viento débil o de corta duración.

Para graficar el chorro costero en ambos eventos, se deben considerar las implicancias de cada caso. Es necesario tener en cuenta que la distancia máxima hacia el exterior de la costa (x) corresponde al radio de deformación interno de Rossby (L_R), y la velocidad del chorro se determina mediante la siguiente ecuación:

$$v = A \sqrt{\frac{g'}{H}} \exp\left(\frac{-x}{R}\right) \quad (4.2)$$

donde R corresponde a $\sqrt{\frac{g'H}{f^2}}$ y A varía según si la surgencia está completamente desarrollada o no. Para el primer evento, $A = I \sqrt{\frac{H}{g'}}$, mientras que para el segundo evento, donde la surgencia está completamente desarrollada, A se determina como $A = H \exp\left(\frac{d}{R}\right)$ con $d = \frac{I}{f} - R$.

Todo este procedimiento se realizó utilizando el código (7) que se encuentra en el anexo, y cuyos resultados se pueden ver en la Figura (4.2).

Dado que el segundo evento, ocurrido entre el 13 y el 27 de enero del 2000, presenta una surgencia completamente desarrollada hacia el final del mismo, es posible estimar la posición del frente mediante la ecuación anteriormente mencionada $d = \frac{I}{f} - R$. Con $I = 3.1 [m/s]$, $f = 2\Omega \sin(-37) [s^{-1}]$, y $R = 28.5 [km]$, se obtiene que la distancia del frente es aproximadamente **6.8 [km]**. Esto también confirma que $v(x = d) = \sqrt{g'H} = 2.5 [m/s]$, lo cual se puede observar claramente en la Figura (4.2).

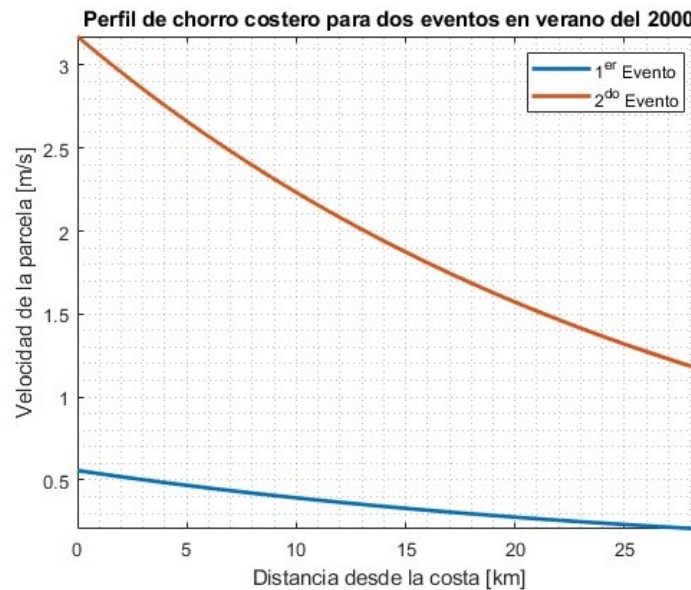


Figura 4.2: Gráfica del chorro costero durante los eventos del 7 al 11 de enero y del 13 al 27 de enero del año 2000.

4.3. Construya histogramas de duración e intensidad de los eventos de surgencia en 37°S. Para definir el límite de los eventos, elija de acuerdo a algún criterio un valor umbral, bajo el cual comienza y/o termina el evento de surgencia.

Para determinar la duración e intensidad de los eventos de surgencia ocurridos entre 1999 y 2009 en la latitud 37°S, mostrados en las Figuras (4.3) y (4.4) respectivamente, se utilizaron los datos de velocidades verticales en esta latitud. Para establecer el umbral, se empleó la Figura (3.3), de la cual se estimó que el 50 % de las velocidades que generaban surgencia estaban por encima de $1.5 [m/día]$. Por lo tanto, se consideró para el análisis el 50 % superior a este valor.

Utilizando el código (8), que se encuentra en el anexo, se identificaron las velocidades menores al umbral, las cuales sirvieron como guía para determinar el fin de cada evento. Es decir, entre dos velocidades menores a $1.5 [m/día]$ se encuentra un evento de surgencia. Con este método, se determinó la duración en días de cada evento, cuyos resultados se muestran en la Figura (4.3).

Posteriormente, para cada evento identificado en el paso anterior, se determinó el impulso integrando el esfuerzo del viento entre el día de inicio y el día final de cada evento. Con la información obtenida, se generó la Figura (4.4).

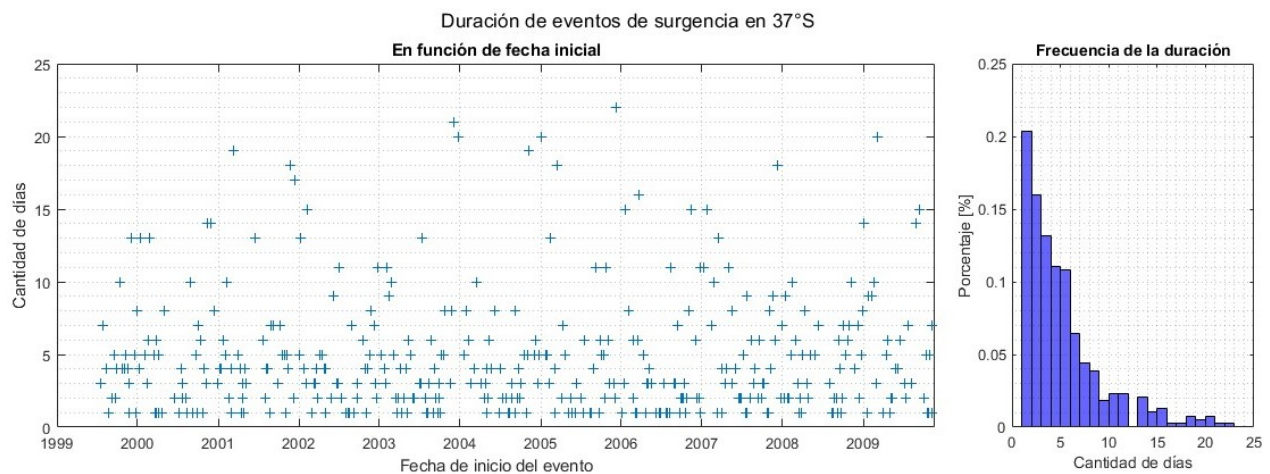


Figura 4.3: Gráficas de la duración de eventos de surgencia en 37°S.

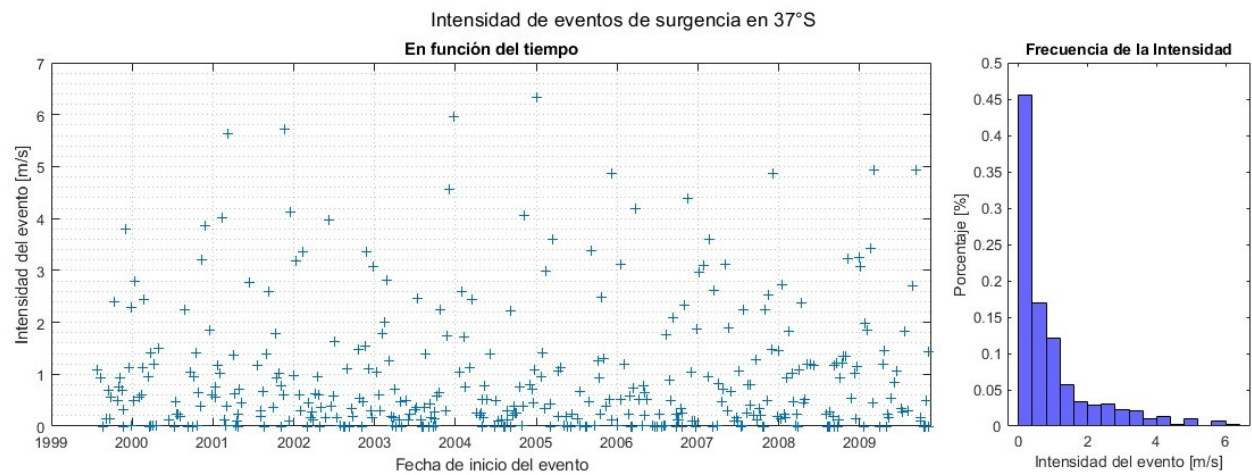


Figura 4.4: Gráficas de la intensidad de eventos de surgencia en 37°S.

5. Anexo

5.1. Transporte zonal de Ekman

```

1 load("VientosCosteros.mat");
2 %V_i componente Norte
3 %U_i componente Este
4
5 %Velocidad de los vientos en 37S, 30S y 21S
6
7 rho_aire = 1.2; % kg/m^3
8 C_d = 1.3e-3;
9 rho_agua = 1025; % kg/m^3
10 omega = 7.292e-5; % 1/s
11 lat = [37 30 21];

```

```

12 costa = [27 10 4];
13
14 for i = 1:3
15     angulo(:,i) = atand(Ui(:,i)./Vi(:,i)); %Angulo c/r al norte (eje y)
16
17     %Debemos hayar los vectores de viento cuyas componentes
    apunten hacia el "sur", de modo que
18
19     A = find(Ui(:,i) > 0 & Vi(:,i) < 0);
20     B = find(Ui(:,i) <= 0 & Vi(:,i) < 0);
21     angulo(A,i) = angulo(A,i) + 180; %Rotar el angulo para que tenga
    componente norte
22     angulo(B,i) = angulo(B,i) - 180;
23
24     %Ahora consideramos el angulo que tiene la costa en la latitud
    dependiendo con respecto al norte. Este valor debe restarse al angulo
    medido para considerar adecuadamente la costa
25
26     angulo(:,i) = angulo(:,i) - costa(i);
27     clear A B
28     %determinamos la magnitud del vector
29     magnitud(:,i) = sqrt((Vi(:,i).^2) + (Ui(:,i).^2));
30     f(i) = 2*omega*sind(-lat(i));
31
32     for j = 1:3769
33         y(j,i) = magnitud(j,i) * cosd(angulo(j,i));
34         x(j,i) = magnitud(j,i) * sind(angulo(j,i));
35         tau_y(j,i) = rho_aire * C_d * y(j,i) * magnitud(j,i); % Pa
36         M_x(j,i) = tau_y(j,i) / (rho_agua*f(i)); % m^3/s/m
37     end
38 end

```

Código 1: Determinación del transporte zonal de Ekman en tres latitudes al sur del ecuador por aproximadamente 10 años.

5.2. Sensibilidad al coeficiente de arrastre

```

1 viento = [2 5 10 15 20 25]; % m/s
2 CD_aleatorios = linspace(0.9e-3, 2.5e-3, 6);
3
4 for i = 1:6
5     for j = 1:6
6         tau(i,j) = rho_aire * CD_aleatorios(i) * viento(j).^2; % Pa
7         %primera columna es para 5 m/s y seis distintos Cd
8     end
9 end
10
11 figure()
12 hold on
13 for i = 1:6
14     plot(CD_aleatorios',tau(:,i),'LineWidth',2)

```

```

15 end
16 axis tight
17 grid minor
18 xlabel("Coeficiente de arraste")
19 ylabel("Esfuerzo del viento \tau [Pa]")
20 legend(string(viento + " m/s"), 'Location', 'northwest')

```

Código 2: Comparación de la sensibilidad del esfuerzo del viento

5.3. Ciclo anual transporte de Ekman

```

1 count = 0;
2 for i = 1:12
3     A = find(fecha(:,2)==i);
4     count = count+1;
5     for j = 1:3
6         dat(count,j) = nanmean(M_x(A,j));
7     end
8     clear A
9 end
10 meses = {'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct', 'Nov',
11         'Dic'};
12 figure()
13 plot(dat(:,1), 'o-', 'LineWidth', 2)
14 hold on
15 plot(dat(:,2), 'o-', 'LineWidth', 2)
16 plot(dat(:,3), 'o-', 'LineWidth', 2)
17 xlim([1 12])
18 xticklabels(meses)
19 grid minor
20 xlabel('Meses')
21 ylabel('Transporte de Ekman promedio [m^3/s/m]')
22 title('Ciclo anual del transporte de Ekman')
23 legend('37S', '30S', '21S', Location='northeast')

```

Código 3: Grafica del ciclo anual del transporte de ekman para cada latitud.

5.4. Velocidades verticales por estación

```

1 ci = 2.5; % m/s
2
3 for i = 1:3
4     Lr(i) = ci ./ f(i); % m
5     w(:,i) = M_x(:,i)/Lr(i); % m/s
6 end
7
8 w = w * 86400; % m/dia
9 estaciones = {'verano', 'otono', 'invierno', 'primavera'};
10
11 for i = 0:3

```

```

12 A1 = find(fecha(:,2) == (3*i + 1));%
13 A2 = find(fecha(:,2) == (3*i + 2));
14 A3 = find(fecha(:,2) == (3*i + 3));
15 est = [A1' A2' A3'];
16 figure()
17 subplot (1,3,3)
18     histogram(w(est,1),"NumBins", 15, "BinEdges", [-5:10], 'FaceColor',
19 'b', 'Normalization', 'probability')
20     ylabel('[%]')
21     xlabel('w [m/día]')
22     title('37S')
23     grid minor
24 subplot (1,3,2)
25     histogram(w(est,2),"NumBins", 15, "BinEdges", [-5:10], 'FaceColor',
26 'r', 'Normalization', 'probability')
27     ylabel('[%]')
28     xlabel('w [m/día]')
29     title('30S')
30     grid minor
31 subplot (1,3,1)
32     histogram(w(est,3),"NumBins", 15, "BinEdges", [-5:10], 'FaceColor',
33 ,[0.9290 0.6940 0.1250], 'Normalization', 'probability')
34     ylabel('[%]')
35     xlabel('w [m/día]')
36     title('21S')
37     grid minor
38     sgtitle("Velocidades verticales en " + estaciones(i+1), 'FontSize', 20, '
39 FontWeight', 'bold')
40     clear A1 A2 A3 est
41 end

```

Código 4: Grafico de barras de velocidades verticales.

5.5. Esfuerzo del viento

```

1 A1 = find(fecha(:,1) == 2000 & fecha(:,2) == 1);
2 A2 = find(fecha(:,1) == 2000 & fecha(:,2) == 2);
3 A3 = find(fecha(:,1) == 2000 & fecha(:,2) == 3);
4
5 ver = [A1', A2', A3'];
6
7 B = fecha(ver,:);
8 tau = tau_y(ver,1);
9
10 media = nanmean(tau);
11
12 figure()
13 bar(datetime(B),tau)
14 hold on
15 %yline(media,Color='r',LineWidth=2)
16 axis tight
17 xlabel('Fecha')

```

```

18 ylabel('Esfuerzo del viento [Pa]')
19 title('Esfuerzo del viento paralelo a la costa durante el verano del 2000
    en 37 S ')

```

Código 5: Serie de tiempo del esfuerzo del viento meridional, en 2000 sobre la latitud 37°S

5.6. Impulso del viento

```

1 D1= find(B(:,2)==1 & B(:,3)>6 & B(:,3)<12);
2 D2 = find(B(:,2)==1 & B(:,3)>12 & B(:,3)<28);
3
4 %Impulso tiene unidades de m/s, por lo que la unidad de medida de la
   integral debe resultar kg/ms
5 date1 = B(D1,3)*86400; % seg
6 date2 = B(D2,3)*86400; % seg
7
8 int1 = trapz(date1, tau(D1)); % kg/ms
9 int2 = trapz(date2, tau(D2)); % kg/ms
10
11 H = 50; % m
12
13 I1 = int1/(rho_agua*H); % m/s
14 I2 = int2/(rho_agua*H); % m/s

```

Código 6: Impulso del viento para dos eventos en enero de 2000

5.7. Chorro costero

```

1 c = 2.5; % m/s
2 g = (c^2)/H; %m/s^2
3
4 L_R = c/f(1); % m posicion vinal "x"
5 dist = linspace(0,L_R,1000); % m
6 R = c/f(1); % m
7
8 A1 = I1* sqrt(H/g); % m
9
10 d = (I2/f(1)) - R; % m
11 A2 = H*(exp(d/R)); % m
12
13 count = 0;
14 for k = 1:length(dist)
15     count = count + 1;
16     v1(count) = A1*(sqrt(g/H))*(exp((-dist(k))/R)); % m/s
17     v2(count) = A2*(sqrt(g/H))*(exp((-dist(k))/R)); % m/s
18 end
19
20 figure()
21 plot(-dist/1000,v1,'LineWidth',2)
22 hold on

```



```

23 plot(-dist/1000,v2,'LineWidth',2)
24 axis tight
25 grid minor
26 legend('1^{er} Evento','2^{do} Evento',Location='northeast')
27 xlabel('Distancia desde la costa [km]')
28 ylabel('Velocidad de la parcela [m/s]')
29 title('Perfil de chorro costero para dos eventos en verano del 2000')

```

Código 7: Gráfico de chorro costero para dos eventos en enero de 2000

5.8. Gráficas duración e intensidad

```

1 surg37 = w(:,1);
2
3 B = find(surg37 < 1.5);
4 B = [0 B'];
5
6 count = 0;
7 for i = 2: length(B)
8     D(i-1) = (B(i)-1)-B(i-1);
9     if D(i-1) == 0
10         continue;
11     else
12         count = count + 1;
13         F(count) = B(i-1)+1; %para fecha inicial
14         L(count) = B(i)-1; %para fecha final
15     end
16 end
17 D(find(D == 0)) = [];
18
19 date_i = fecha(F',1:3);
20 date_f = fecha(L',1:3);
21 % primer evento = fecha(1)
22 % 2do evento B(i-1)+1
23
24 figure()
25 subplot(1,4,[1 2 3])
26     plot(datetime(date_i),D,'+')
27     xlim([datetime([1999 1 1]) datetime(fecha(end,:))])
28     xlabel('Fecha de inicio del evento')
29     ylabel('Cantidad de días')
30     title('En función de fecha inicial')
31     grid minor
32 subplot(1,4,4)
33     histogram(D,"BinEdge",[0:25],'FaceColor','b','Normalization','
probability')
34     %axis tight
35     grid minor
36     xlim([0 25])
37     xlabel('Cantidad de días')
38     ylabel('Porcentaje [%]')
39     title('Frecuencia de la duración')

```

```

40 sgtitle('Duración de eventos de surgencia en 37 S ')
41
42 %%
43 for i = 1:388
44 T(i) = hours(datetime(date_f(i,:)) - datetime(date_i(i,:))+1)/24;
45 X1(i) = (find(fecha(:,1) == date_i(i,1) & fecha(:,2)==date_i(i,2) & fecha
    (:,3) ==date_i(i,3)));
46 X2(i) = find(fecha(:,1) == date_f(i,1) & fecha(:,2)==date_f(i,2) & fecha
    (:,3) ==date_f(i,3));
47 durac = [X1(i):X2(i)]*86400;
48
49     if T(i) == 1
50         integral(i) = tau_y(X1(i),1); % kg/ms
51     else
52
53         integral(i) = trapz(durac, tau_y(X1(i):X2(i),1)); % kg/ms
54     end
55 %
56 H = 50; % m
57 Impulso(i) = integral(i)/(rho_agua*H); % m/s
58 clear durac
59 end
60 figure()
61 subplot(1,4,[1 2 3])
62     plot(datetime(date_i),Impulso,'+')
63     grid minor
64     xlim([datetime([1999 1 1]) datetime(fecha(end,:))])
65     xlabel('Fecha de inicio del evento')
66     ylabel('Intensidad del evento [m/s]')
67     title('En función del tiempo')
68 subplot(1,4,4)
69     histogram(Impulso,"NumBins", 16,'FaceColor','b','Normalization','
    probability')
70     xlabel('Intensidad del evento [m/s]')
71     ylabel('Porcentaje [%]')
72     title('Frecuencia de la Intensidad')
73 sgtitle('Intensidad de eventos de surgencia en 37S')

```

Código 8: Figuras de la duración e intensidad de eventos de surgencia en 37°S

Referencias

- [1] Pond, S., and G. L. Pickard. Introductory dynamical oceanography. Gulf Professional Publishing, 1983.