

Reporte Técnico. Procesamiento, control de calidad y estudio de variabilidad climática en la estación El Pelado (CENAIM-ESPOL) durante los años 2013 y 2017

Jonathan Cedeño Oviedo.

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar FIMCM. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

Introducción

En diciembre de 2017, mediante correo electrónico, se solicitó la información de CTD de El Pelado, para analizarlo en el contexto de variabilidad climática y estacionalidad. Hacia 2019, también se realizó otro pedido de información, para incluir la data cruda de los perfiles CTD. En ambos casos, la información fue compartida desde CENAIM para su trabajo.

En el contexto del año 2019 y 2020, se aprovecharon el contexto de una ayudantía de gestión (2019, estudiantes Nelly Díaz y Romina Granja); y el dictado de los cursos de Oceanografía Física y Análisis de Información Oceanográfica (2020, ambos dictado por el suscrito), para trabajar esta información.

Se procedió de la siguiente manera: en 2019 se organizaron los múltiples cast de CTD enviados desde CENAIM. En el curso de Oceanografía Física (2020-1T) se organizó el procesamiento de la información CTD, (selección cast de bajada, alineación, filtrado, decimado). En el curso de Análisis de Información Oceanográfica (2020-2T) se realizó el análisis exploratorio y control de calidad de la información, a través de diagramas de cajas. Y particularmente, se trabajó con la serie de tiempo de la profundidad de la isoterma de 20°C (termoclina) para obtener un análisis espectral, y observar los niveles de energía para las respectivas periodicidades. También, fue observada las variaciones de la estructura termo-halina durante esos años, los cuales coincidieron con un evento El Niño de categoría fuerte (anomalía de hasta 2.15°C según el índice ICEN - región Niño 1+2), así como un evento El Niño Costero.

Datos y metodología

Los datos de temperatura y salinidad corresponden a la estación oceanográfica “El Pelado” perteneciente a CENAIM-ESPOL. Su ubicación inicial fue al este del Islote El Pelado (EP1, ver Tabla 1 y Figura 1). El inicio de las mediciones data de 1992. La periodicidad de muestreo es semanal (7 días, centrada en los jueves). En años recientes, el punto de muestreo de la estación se ubicó al suroeste de su posición inicial (EP2, 2°0'12.6" S, 80°48'59" W, 50 m de profundidad, Figura 1). Esta última ubicación es la que corresponde con el período de análisis de este estudio (2013 al 2017).

estación	grados latitud	minutos	segundos	°	grados longitud	minutos	segundos	°	prof. [m]
EP1	1	55	53.0	S	80	46	55.0	W	30
EP2	2	0	12.6	S	80	48	59.0	W	50

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la estación oceanográfica El Pelado según Riofrío 2014 (EP1) y Bayot 2010 (EP2). Los datos de este reporte (2013-2017) corresponden con la ubicación EP2.

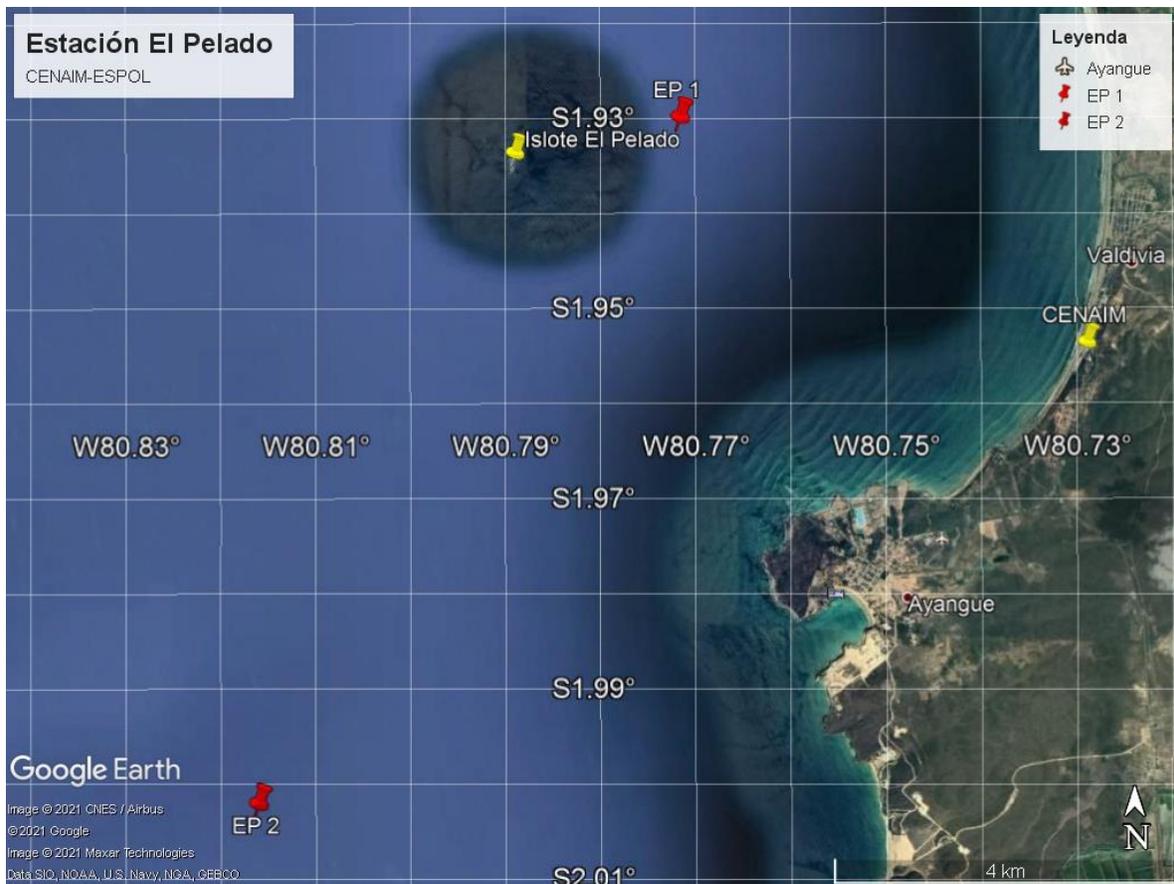


Figura 1. Estación oceanográfica El Pelado, y su situación geográfica respecto a la costa de la provincia de Santa Elena. EP1 (El Pelado 1) es la localización “histórica” de la estación, que fue reseñada por Riofrío (2004). EP2 (El Pelado 2) es la localización “reciente” de la estación, reseñada por Bayot (2010). Los datos de este reporte (2013-2017) corresponden con la ubicación EP2.

Para las mediciones de T/S (Temperatura/Salinidad), la estación usó inicialmente un equipo CTD Seabird SBE 19 Seacat, alternando con un CTD ALEC Electronics ADR 1000 (Figura 2, a y b). Hasta mediados del año 2010, dichos equipos se vieron reemplazados por un CTD Sontek-YSI Castaway (Figura 2, c y d). Más recientemente (año 2018), se inició la transición hacia las mediciones de variables oceanográficas de la columna de agua con un CTD RBR Maestro. Los datos de este reporte (2013-2017) corresponden con el uso del CTD Sontek-YSI Castaway. El procedimiento de toma de datos se detalla en el Anexo 3, basado en Ger y Torres (2018) y Sontek-YSI (2021a).

El CTD Castaway es un equipo portátil, de dimensiones compactas. Su tasa de muestreo es 5 Hz (ciclos por segundo), y su profundidad máxima de muestreo es 100 m. La carcasa del equipo es construida en plástico, y tiene un peso de 0.45 kg (aire) y 0.03 kg (agua). Otras características técnicas se detallan en la Tabla 2.

The CastAway-CTD Output Parameters

	Range	Resolution	Accuracy	Measured or Derived
Conductivity	0 to 100,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\pm 0.25\% \pm 5 \mu\text{S}/\text{cm}$	Measured
Temperature	-5° - 45° C	0.01° C	$\pm 0.05^\circ \text{C}$	Measured
Pressure	0 to 100 dBar	0.01 dBar	$\pm 0.25\% \text{FS}$	Measured
Salinity	Up to 42 (PSS-78)	0.01 (PSS-78)	± 0.1 (PSS-78)	PSS-78 ³
Sound Speed	1400 - 1730 m/s	0.01 m/s	$\pm 0.15 \text{m/s}$	Chen-Millero ⁴
Density ¹	990 to 1035 kg/m^3	0.004 kg/m^3	$\pm 0.02 \text{kg}/\text{m}^3$	EOS80 ⁵
Depth	0 to 100 m	0.01m	$\pm 0.25\% \text{FS}$	EOS80 ⁵
Specific Conductivity ²	0 to 250,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\pm 0.25\% \pm 5 \mu\text{S}/\text{cm}$	EOS80 ⁵
GPS			10 m	

¹Based on temperature resolution and accuracy.
²Based on 100,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at -5° C.
³1978 Practical Salinity Scale.
⁴Chen-Millero, 1977. Speed-of-sound in sea water at high pressures.
⁵International Equation of State for sea water (EOS-80).

Tabla 2. Parámetros y sus rangos/resolución/precisión de las variables medidas por el equipo Castaway CTD. Fuente: Sontek-YSI (2021b).



Figura 2. Equipos de muestreo de CTD usados en la estación oceanográfica “El Pelado”. a) CTD ALEC Electronics ADR 1000, con unidad de lectura de parámetros en superficie. Este equipo funcionó como alterno. b) CTD Seabird SBE 19 Seacat, durante una operación en cubierta del Crucero CO-3-10 a bordo del B/I Orión. Un equipo similar fue utilizado en El Pelado entre los años 1992 y 2010, con la diferencia que la carcasa era de plástico. c) y d). CTD Sontek-YSI Castaway, equipo que he venido utilizando en El Pelado hasta tiempos recientes, y que corresponden con el período de estudio de este reporte (2013-2017). Fuente: CENAIM (a), archivo personal (b, c, d).

El **procesamiento de los datos** incluyó (1) selección de cast y segmento de bajada del equipo, (2) alineación de sensor de conductividad con temperatura, (3) filtrado del perfil T/S, (4) decimación de la data a intervalos regulares de profundidad.

El criterio de selección de la data, a partir de los registros crudos, fue el siguiente: si para cada fecha de muestreo existe más de un perfil (cast), se selecciona el segundo muestreado. De ese cast, que se conforma por el perfil de bajada y de subida, se extrae el perfil de bajada; debido a que presenta las condiciones más estables de muestreo de conductividad. El CTD desciende en “caída libre”, a una velocidad aproximada de 1 m/s, la cual resulta óptima para la circulación de agua en la celda de conductividad.

La alineación consiste en corregir la data de conductividad respecto a la temperatura, basado en el hecho de que ambos sensores tienen una velocidad de respuesta diferentes (más lento en conductividad, más rápida en temperatura). Para ello, se utilizó la función de Matlab “align_ctd” disponible en la central de intercambio de funciones de Matlab (Matlab central), con valor de iteración de 9 (es decir, itera el resultado 9 veces hasta conseguir el resultado óptimo).

El filtrado de los datos se basó en la aplicación de un filtro pasa-bajo del tipo “media-corrída” o “promedios móviles”, con un peso de 5 unidades. Esto permite que los perfiles de temperatura y salinidad sean “suavizados” en base a la data muestreada primariamente por el CTD, a la profundidad designada según la frecuencia de muestreo.

El último paso del procesamiento de la data de CTD consistió en la “decimación” o selección de intervalos regulares de profundidad. Se siguió el criterio UNESCO (1991), que establece que es común tomar un intervalo regular de 2 metros de profundidad. El proceso de decimación fue implementado con la ayuda de la función “interp1” de Matlab, aplicando un proceso de interpolación del tipo “pchip” a la data de tal forma de capturar los valores correspondientes a intervalos equiespaciados. De esta forma, los valores quedaron cada 2 metros (valores pares), pero reteniendo el valor regular más próximo a la superficie (1 metro).

El **análisis exploratorio** de la data consistió en la elaboración de perfiles T/S para cada uno de los cast seleccionados; y gráficos Hovmoeller de profundidad-tiempo con temperatura y salinidad, para cada uno de los años del análisis.

Por último, el **control de calidad** de la información se basó en la realización de histogramas de frecuencias, así como de diagramas de caja para identificar datos “atípicos” que no cumplan con el criterio regular de este elemento estadístico. Esto fue realizado para cada estrato de profundidad.

Los diagramas de caja pertenecen a la familia de las técnicas de Análisis Exploratorio de datos, y usa fundamentalmente el concepto de estadística de posición. Se compone de “bigotes” o “barbas”, que marcan los valores más bajos y altos de la distribución, y una caja conformada por los cuartiles q1, q2 (mediana) y q3. Por ello, se corresponde con una distribución de frecuencias (histograma).

Los bigotes del diagrama de cajas marcan los valores que son iguales a 1.5 veces el rango intercuartil, menos (más) el valor del cuartil q1 (q3). Si existe un valor que es menor (mayor) a esta marca, se cataloga como “atípico”, lo que motiva una revisión de la data para analizar el origen de la inconsistencia.

Resultados

El procesamiento de la data CTD, así como una primera parte del análisis exploratorio (perfiles T/S) fue llevado a cabo por los estudiantes del curso de “Oceanografía Física” del Término 1 2020, mediante la actividad de “Proyecto final de curso”. Se organizaron en grupos (cinco), y cada grupo analizó un año (del 2013 al 2015). Un resultado de esta primera etapa del trabajo global de CTD El Pelado se muestra en la Figura 3.

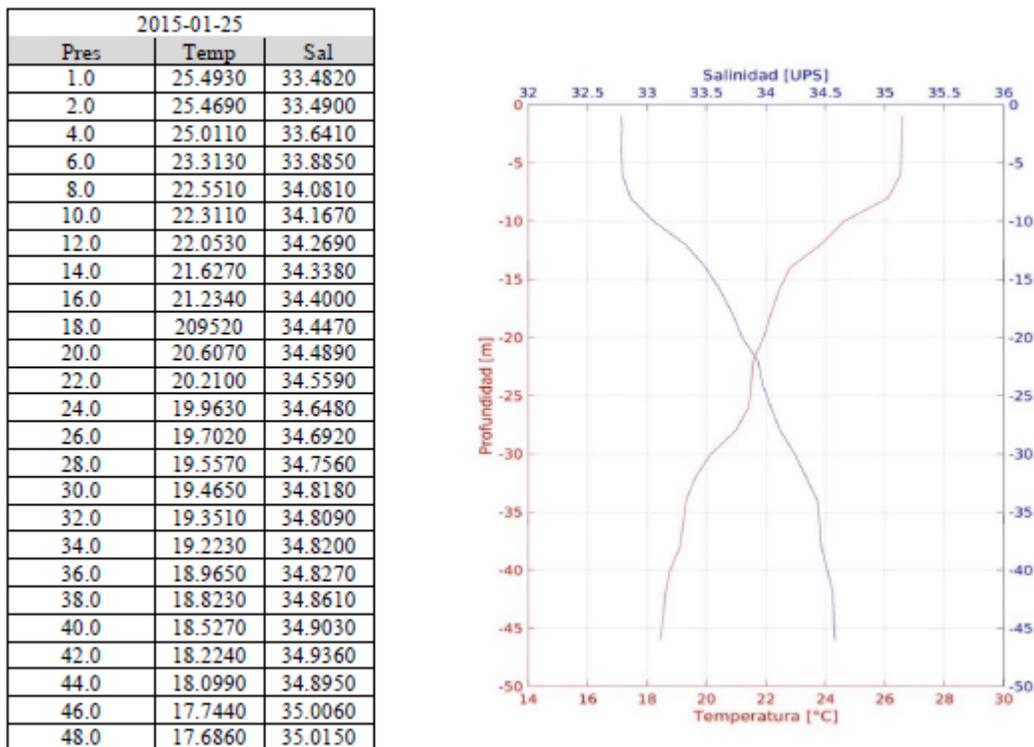


Figura 3. Perfiles T/S del 25-enero de 2015, con su respectiva gráfica. La información de CTD fue decimada a un intervalo regular de 2 metros, reteniendo el valor más próximo a superficie (1 metro).

La organización de la data equiespaciada en profundidad es ventajosa por un sinnúmero de razones. Puede almacenarse de manera consistente en el tiempo (organizando una base de datos de la variable respectiva). Facilita la realización de las gráficas tipo-Hovmoeller (con profundidad). Y permite también trabajar el Control de calidad estrato por estrato de profundidad.

Luego de realizado el procesamiento de la información, se realizó el control de calidad de la data. Dicho trabajo fue realizado por los estudiantes del curso de “Análisis de Información Oceanográfica” del Término 2 2020, mediante la actividad de “Proyecto final de curso”. Se organizaron en grupos

(cinco), y cada grupo analizó un año (del 2013 al 2015) para los gráficos Hovmoeller; y un conjunto de profundidades para el caso de los histogramas y diagramas de caja.

Los resultados de este trabajo se ejemplifican en las Figuras 4 y 5.

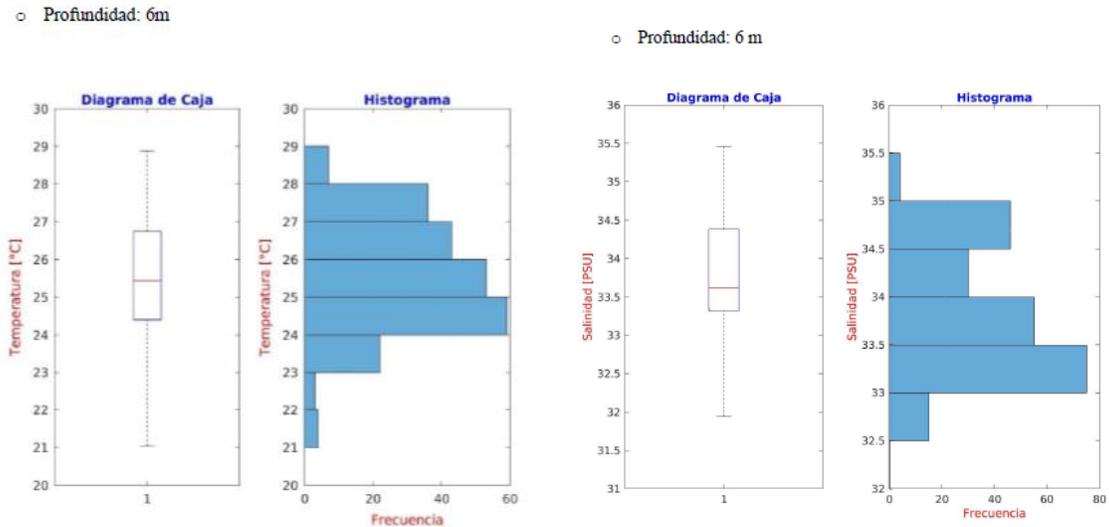


Figura 4. Diagrama de caja e histogramas para Temperatura (izquierda) y salinidad (derecha). Profundidad: 6 metros.

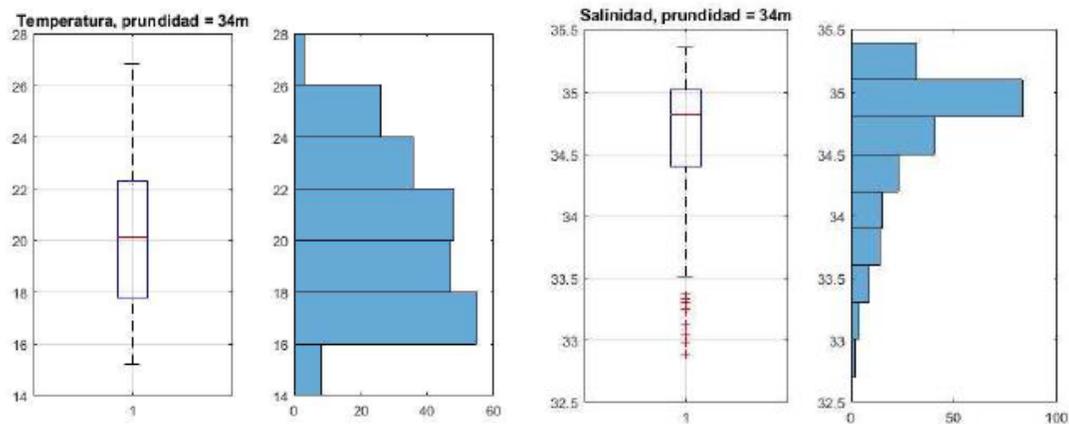


Figura 5. Diagrama de caja e histogramas para Temperatura (izquierda) y salinidad (derecha). Profundidad: 34 metros.

En las Figuras 6 y 7 se sintetizan los diagramas de caja en conjunto, para todas las profundidades, para cada una de las variables (temperatura, salinidad). Los valores atípicos (marcados con un asterisco rojo, y que se ubican bajo y sobre los bigotes) forman 4 grupos por su ubicación en su gráfico, los cuales so descritos a continuación:

- Grupo 1: Luego de revisada la data en su origen, se concluye que n hay mayores novedades (los datos no son atípicos).

- Grupo 2: La revisión de esta data compromete un único factor que podría explicar estas anomalías: a mayor profundidad, la disponibilidad de datos se reduce (debido a que no siempre toda la columna de 50 metros es muestreada en cada visita semanal a la estación. Por lo que el número de observaciones es diferente (menor) al que otros estratos, lo que hace que la muestra sobre la cual se determinan los parámetros estadísticos sea menor también. Haciendo que algunos valores puedan identificarse como “atípicos”. Debido a los elementos expuestos, el conjunto de estos valores es clasificado como “no-atípico”.

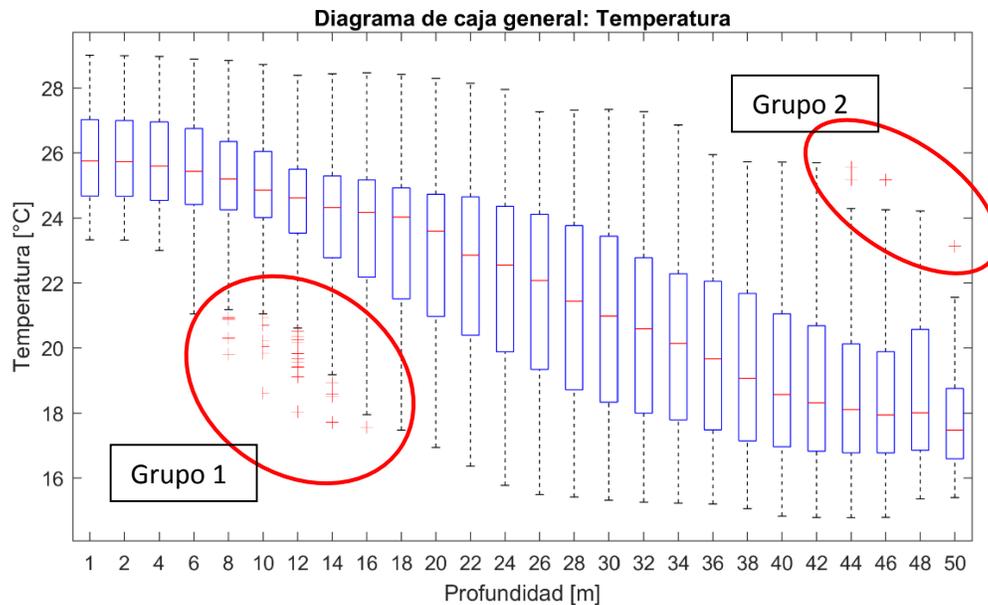


Figura 6. Diagrama de caja del conjunto de datos (2013-2017), de la variable temperatura.

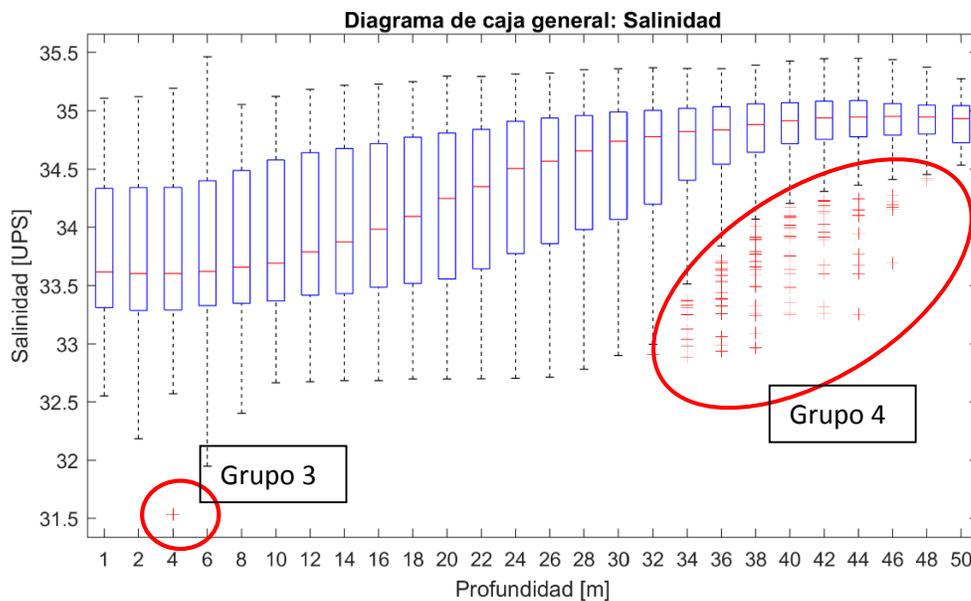


Figura 7. Diagrama de caja del conjunto de datos (2013-2017), de la variable salinidad.

- Grupo 3: Estos datos merecen la mayor revisión de todos. Son calificados como “atípicos” bajo toda regla, puesto que son muy distintos a los valores próximos en el tiempo. La fecha de muestreo comprometida es el 2-junio de 2016 (Figura 8). Y la salinidad encontrada típicamente en ese estrato de profundidad es de 32.5 a 35.5. aproximadamente (basado en el rango del bigote).
- Grupo 4: Igual que el Grupo 2, la identificación de valores atípicos está sesgada por un número de observaciones menor. Por otro lado, en algunas fechas se observa una fuerte variabilidad en la salinidad, lo que hace tener valores relativamente altos/bajos en los estratos entre 32 y 46 metros. Debido a los elementos expuestos, el conjunto de estos valores es clasificado como “no-atípico”.

2016-06-02

pres	temp	saln
1.00	26.25	33.70
2.00	26.21	32.18
4.00	26.18	31.53
6.00	26.16	31.95
8.00	26.13	32.40
10.00	25.08	33.08
12.00	21.37	33.43
14.00	20.17	33.75
16.00	19.69	33.89
18.00	19.38	33.98
20.00	18.81	34.08
22.00	17.94	34.27
24.00	17.66	34.37
26.00	17.49	34.47
28.00	17.36	34.51
30.00	17.29	34.59
32.00	17.23	34.66
34.00	17.21	34.65
36.00	17.20	34.69
38.00	17.19	34.77
40.00	17.16	34.80
42.00	17.14	34.86
44.00	17.12	34.76
46.00	17.11	34.58
48.00	17.09	34.58

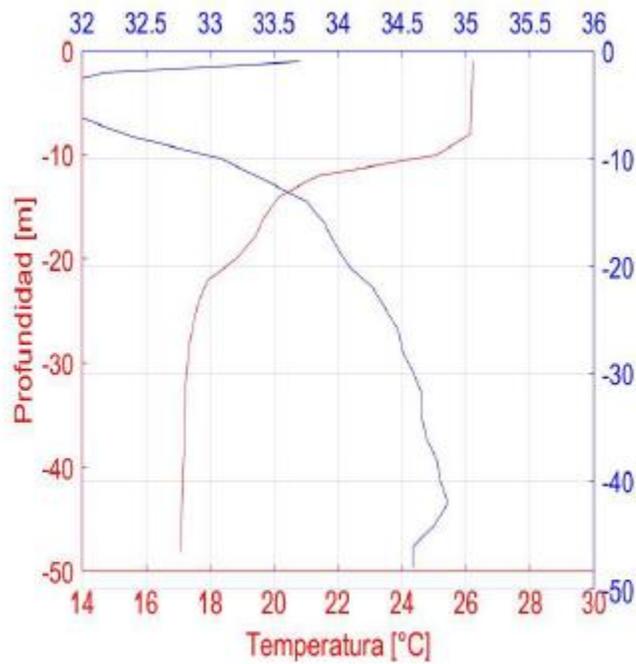


Figura 8. Perfiles T/S correspondiente con el valor “atípico” encontrado. Entre 2 y 8 metros de profundidad, la salinidad marca valores menores a 32 UPS.

En la Figura 9 se muestran los gráficos Hovmoeller de temperatura y salinidad. Durante el período en estudio, se observó en la estructura termo-halina de la estación, el impacto de un evento de escala interanual (El Niño de 2015-16), y de un evento del tipo “El Niño Costero”. Estas representan las variaciones más relevantes en la T/S, por lo que son descritas a continuación como casos separados, con su respectiva gráfica.

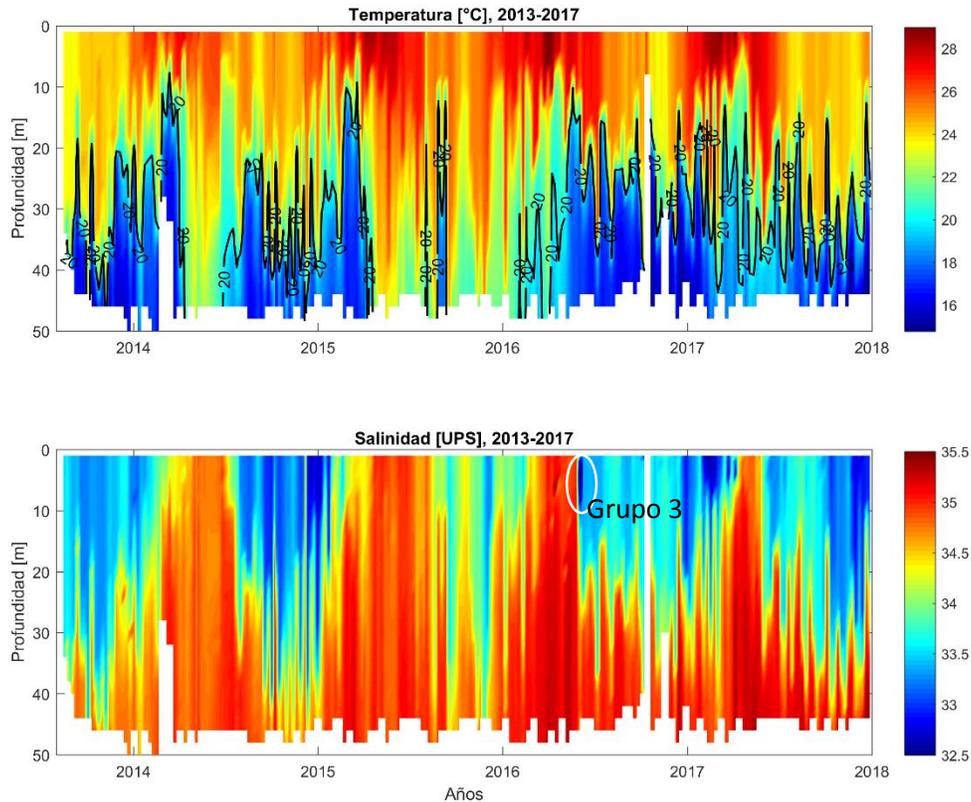


Figura 9. Gráfico Hovmoeller (profundidad-tiempo) de temperatura (panel superior) y salinidad (panel inferior) para el período de estudio. Desde agosto de 2013 hasta diciembre de 2017.

También, es señalado los valores del “Grupo 3”, salinidades superficiales del 2-junio de 2016 que tienen valores menores a 32 UPS. En el continuo de la gráfica, los valores más próximos a la superficie cambian abruptamente de 35 a 33.3 UPS para esa fecha, por lo que observar valores en torno a 32 UPS resulta atípico.

El Niño 2015-16

Los eventos El Niño (fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur) suelen reflejarse en las estructuras de temperatura-salinidad del Pacífico Tropical como un incremento de la temperatura en los estratos más superficiales (contenido de calor más alto), producto de la advección de agua cálida por efecto del tránsito de ondas de Kelvin de hundimiento que se propagan desde el Pacífico Occidental hacia el Pacífico Oriental. Este comportamiento se observa en la estación El Pelado (Figura 11), en donde la termoclina se profundiza a partir de mayo-2015. Durante un breve período de tiempo, la termoclina vuelve a reaparecer (inicios de agosto e inicios de septiembre), pero luego ésta se vuelve a profundizar en los siguientes meses, hasta febrero 2016. Los valores que caracterizaron el evento 2015-16 se encuentran detallados en la Tabla 3, y en la Figura 10.

a) ONI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2015	0.55	0.47	0.53	0.7	0.93	1.18	1.52	1.87	2.17	2.43	2.58	2.65
2016	2.5	2.15	1.59	0.94	0.39	-0.07	-0.36	-0.54	-0.63	-0.69	-0.67	-0.56

B) ICEN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2015	-0.08	-0.14	0.26	0.97	1.69	2.19	2.18	2.16	2	2.2	2.15	2.06
2016	1.78	1.54	1.1	0.85	0.64	0.56	0.43	0.36	0.37	0.32	0.25	0.47

Tabla 3. Índices ONI (basado en el Niño 3.4) e ICEN (basado en el Niño 1+2), para los años 2015 y 2016. Los valores subrayados en rojo (azul) determinan condiciones El Niño (La Niña) según la definición operativa de NOAA. Fuente de datos: NOAA, IGP.

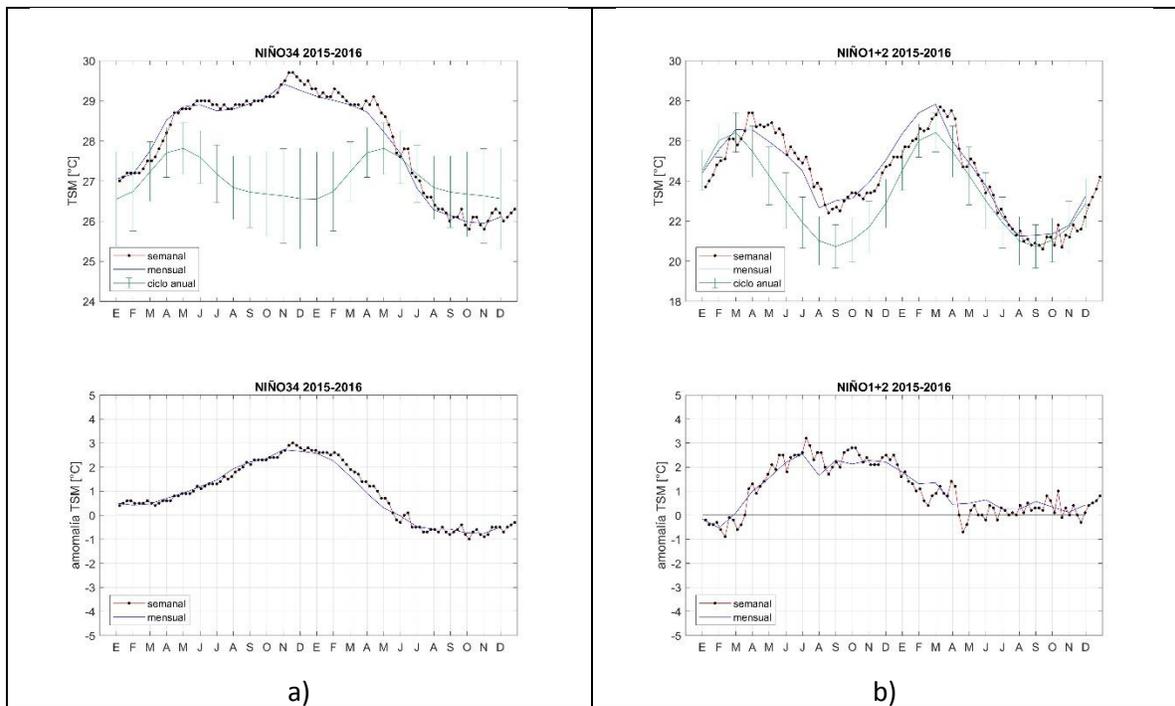


Figura 10. Índices Niño 3.4 (a) y Niño 1+2 (b) durante el evento El Niño 2015-16. Los datos corresponden a valores semanales/mensuales según la indicación. Fuente de datos: NOAA. Procesamiento: ESPOL.

Entre los principales pulsos de la onda de Kelvin (observados por la profundidad de la isoterma de 24 grados, más próxima a la superficie), tenemos: mayo-2015, mediados de septiembre, noviembre, e inicios de enero. En los otros casos, se observa la alternancia de una isoterma de 24 grados más superficial, por el efecto de que luego de la generación de una onda de Kelvin de hundimiento (valle de la onda, implica profundización), le sigue una onda de Kelvin de afloramiento (cresta de la onda, implica superficialización). Siendo este último evento más crítico, durante fin de agosto-comienzo de septiembre 2015.

La estructura de salinidad es un poco más compleja. Según la climatología propuesta por Riofrío (2004), se observa un incremento de los valores de salinidad en toda la columna de agua centrado en el mes de abril. Luego, durante el evento de El Niño 2015-16, se observa también un incremento de la salinidad en toda la columna, empezando en el mes de marzo y prolongándose hasta agosto. Este comportamiento puede ser función del denominado “Springtime Surge STS”, o “reversa de primavera” (boreal), que es característico del ciclo anual de la Subcorriente Ecuatorial EUC (Yu & McPhaden, 1999b). Esta reversa está mediada por el decaimiento estacional de los vientos zonales ecuatoriales (Alisios del Sudeste) y la disminución estacional de la tendencia de momentum zonal de las Ondas de Inestabilidad Tropical (TIW, Harrison et al., 2001).

Otros pulsos de alta salinidad presentes en la estructura halina de este evento pueden explicarse por la propagación de ondas de Kelvin. Estas tienen una fase de hundimiento (cálidas), o de afloramiento (frías), las cuales se suceden una a continuación de la otra si es que el forzamiento del viento no se mantiene constante. La fase de afloramiento de la onda de Kelvin, observada por ejemplo a fines de agosto-comienzo de septiembre, octubre y diciembre 2015, llevaron a un levantamiento de la termoclina (20°C) y de la isoterma de 23.8°C, así como un levantamiento de la isohalina de 34.4 UPS hasta los 10 m, lo cual fue consistente en estos tres pulsos. Siendo la onda de Kelvin de afloramiento de agosto-septiembre la más intensa, tanto por la forma en que deformó la termoclina, así como la isohalina de 34.4 UPS.

Durante los meses de agosto-2015 a febrero-2016, la salinidad en superficie (0-10 m) se caracterizó por valores relativamente bajos en superficie (~34.25 UPS), los cuales alcanzaron el máximo de profundidad de la estación al paso de las ondas de Kelvin de hundimiento. En general, la salinidad en los estratos superficiales se mantienen entre 34 y 34.5 UPS por la advección de ATS desde el norte (Recalde, 2014). La cual puede disminuir más conforme el descenso estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la llegada de la estación de lluvias en la Costa ecuatoriana (verano austral).

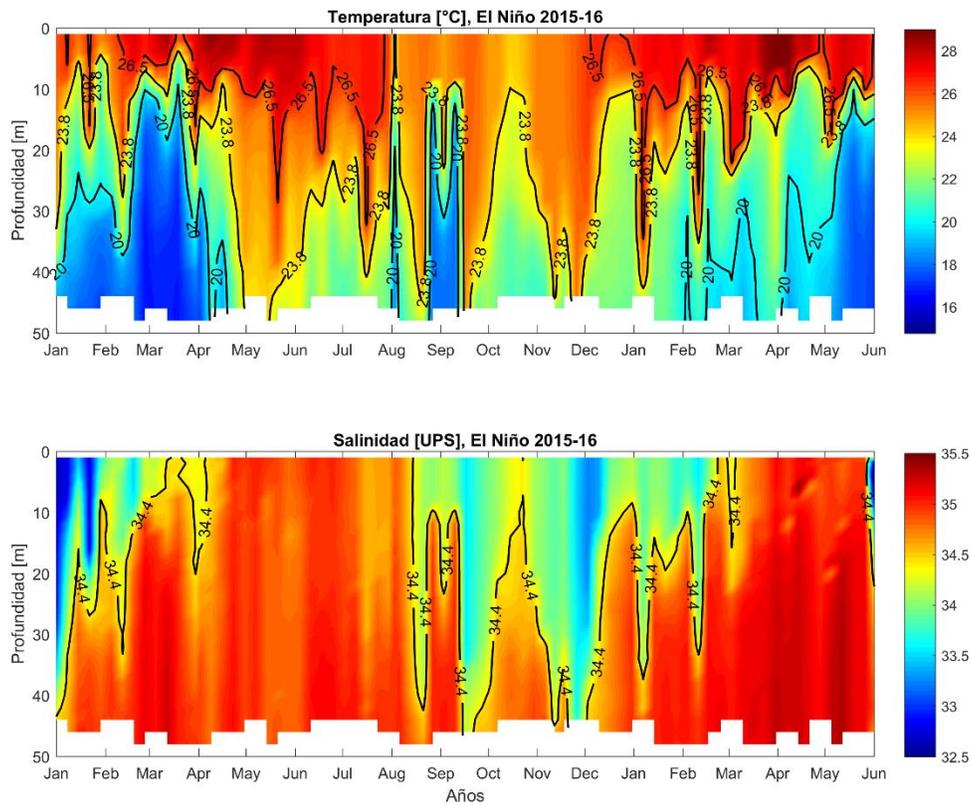


Figura 11. Gráfico Hovmoeller (profundidad-tiempo) de temperatura y salinidad para El Niño 2015-16 (desde enero 2015 hasta mayo 2016).

El Niño Costero 2017

El Niño Costero 2017 se caracterizó por ser un evento de origen, desarrollo, y decaimiento rápido, cuya dinámica es fundamentalmente distinta a los eventos El Niño (como parte de la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur). Una de las posibles hipótesis del evento es que se produjo por anomalías en la circulación de vientos de altura en el Pacífico Sur-oriental (Garreaud 2017), lo cual debilitó los vientos Alisios del Sudeste, e intensificó los vientos Alisios del Noreste. Las ondas de Kelvin no jugaron un rol importante en sus procesos oceánicos (Ormaza y Cedeño 2017), siendo estos dominados por el curl del viento meridional, que provocó una profundización de la termoclina y anomalías positivas de TSM récord en los últimos años (Echevin et al. 2018). También, el propio jet de vientos asociado a la intensificación de los Alisios del Noreste (Jet de Panamá) forzaron directamente un flujo superficial cálido (corriente de El Niño, Takahashi y Martinez 2017) hacia el Pacífico Ecuatorial Oriental. Los valores que caracterizaron el evento 2017 se encuentran detallados en la Tabla 4, y en la Figura 12.

a) ONI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2016	2.5	2.15	1.59	0.94	0.39	-0.07	-0.36	-0.54	-0.63	-0.69	-0.67	-0.56
2017	-0.34	-0.16	0.06	0.21	0.31	0.32	0.14	-0.11	-0.38	-0.65	-0.84	-0.98

b) ICEN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2016	1.78	1.54	1.1	0.85	0.64	0.56	0.43	0.36	0.37	0.32	0.25	0.47
2017	0.92	1.37	1.42	1.07	0.46	-0.01	-0.24	-0.47	-0.66	-0.98	-1.19	-1.32

Tabla 4. Índices ONI (basado en el Niño 3.4) e ICEN (basado en el Niño 1+2), para los años 2016 y 2017. Los valores subrayados en rojo (azul) determinan condiciones El Niño (La Niña) según la definición operativa de NOAA. Los valores con color de fuente rojo determinan condiciones extraordinariamente cálidas en el borde costero de Ecuador y Perú (El Niño Costero 2017).

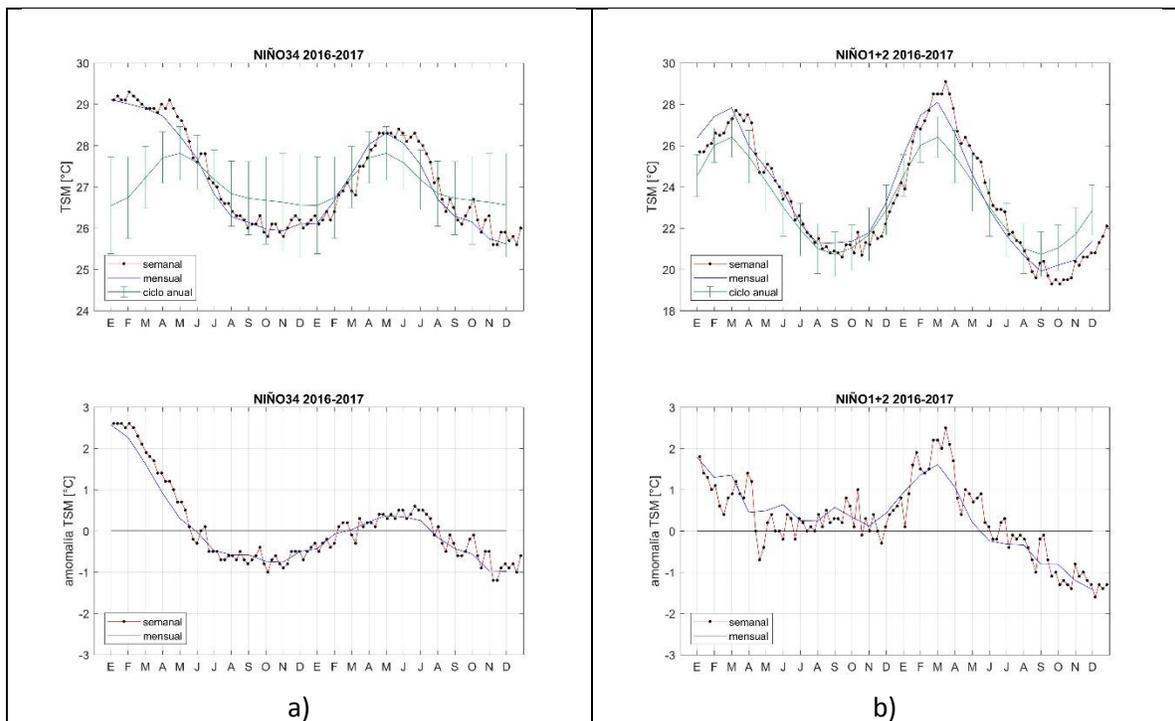


Figura 12. Índices Niño 3.4 (a) y Niño 1+2 (b) durante el evento El Niño Costero 2017 (incluye también 2016). Los datos corresponden a valores semanales/mensuales según la indicación. Fuente de datos: NOAA. Procesamiento: ESPOL.

La estructura termo-halina en El Pelado refleja la propia variabilidad del mar adyacente ecuatoriano, cuya característica principal es el abrupto incremento en los valores de salinidad en toda la columna de agua hacia los meses de marzo a mayo (Figura 13). De manera similar a lo sucedido en la fase temprana de El Niño 2015, así como la característica climatológica de la estación, esta se debió a la reversa de primavera, que es observado en El Pelado como un incremento sostenido de la salinidad en toda la columna de agua, producto de la advección de agua relacionada con la Subcorriente Ecuatorial (AEES, Agua Ecuatorial Sub Superficial, salinidad de 35.1 UPS, Cucalón 1983).

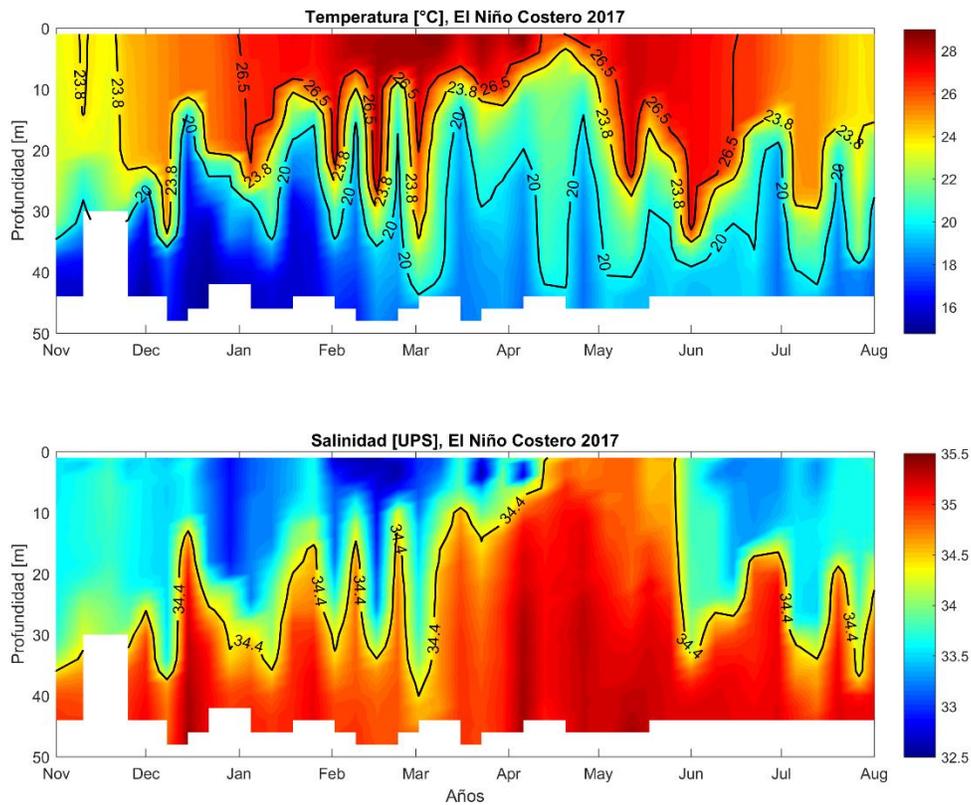


Figura 13. Gráfico Hovmoeller (profundidad-tiempo) de temperatura y salinidad para El Niño Costero 2017 (desde noviembre 2016 hasta agosto 2017).

Otras estructuras destacadas son: el incremento de la temperatura y el descenso de la salinidad en las capas superficiales entre los meses de febrero y abril, relacionado tanto con la influencia del ATS, así como por el aumento de las precipitaciones producto del descenso de la ZCIT. En el mes de febrero, inclusive, la salinidad se ubicó entre los 32.5 y 33 UPS.

Uno de los aspectos más interesantes de este evento es que desde enero-2017, la isoterma de 26.5°C se encontró en la sub-superficie, profundizándose de manera breve hasta los 35 m en junio-2016. Aunque el evento El Niño Costero haya terminado hacia el mes de mayo (con el restablecimiento de los Alisios), las capas más superficiales del océano frente a nuestras costas permanecieron cálidas aún hasta el mes de julio-2017. La marca de 26.5°C es importante debido a que una temperatura superficial del mar en exceso de 26°C indica condiciones favorables para la lluvia, a través del inicio de la convección llana en la atmósfera (Woodman 1999; referido en Takahashi 2004). Mientras que una temperatura de 27.5°C se relaciona con el desarrollo de la convección profunda (Clarke 2008).

Análisis espectral de la termoclina (profundidad de la isoterma de 20°C)

El comportamiento de la profundidad de la isoterma de 20°C (D20, trazador de la termoclina) es crucial para entender la variabilidad de la columna de agua. En la estación El Pelado, como en general en la Costa ecuatoriana, la estructura térmica presenta un ciclo anual distintivo (descrito en Riofrío 2014), así como una importante variabilidad interanual debido a El Niño-Oscilación del Sur.

La D20, sin embargo, presenta algunas limitaciones para su estudio en estaciones costeras. Durante los eventos El Niño, se profundizan a un estrato mayor que el máximo de la estación (50 m); por lo que la serie de tiempo de dicha variable (D20) no presenta valores para esos eventos.

Para evaluar la variabilidad en la escala estacional, este estudio propone el análisis del D20 en los segmentos de datos presentes más largos. El D20, así como la anomalía de D20 respecto a la media entre agosto-2013 y diciembre-2017, se muestra en la Figura 14.

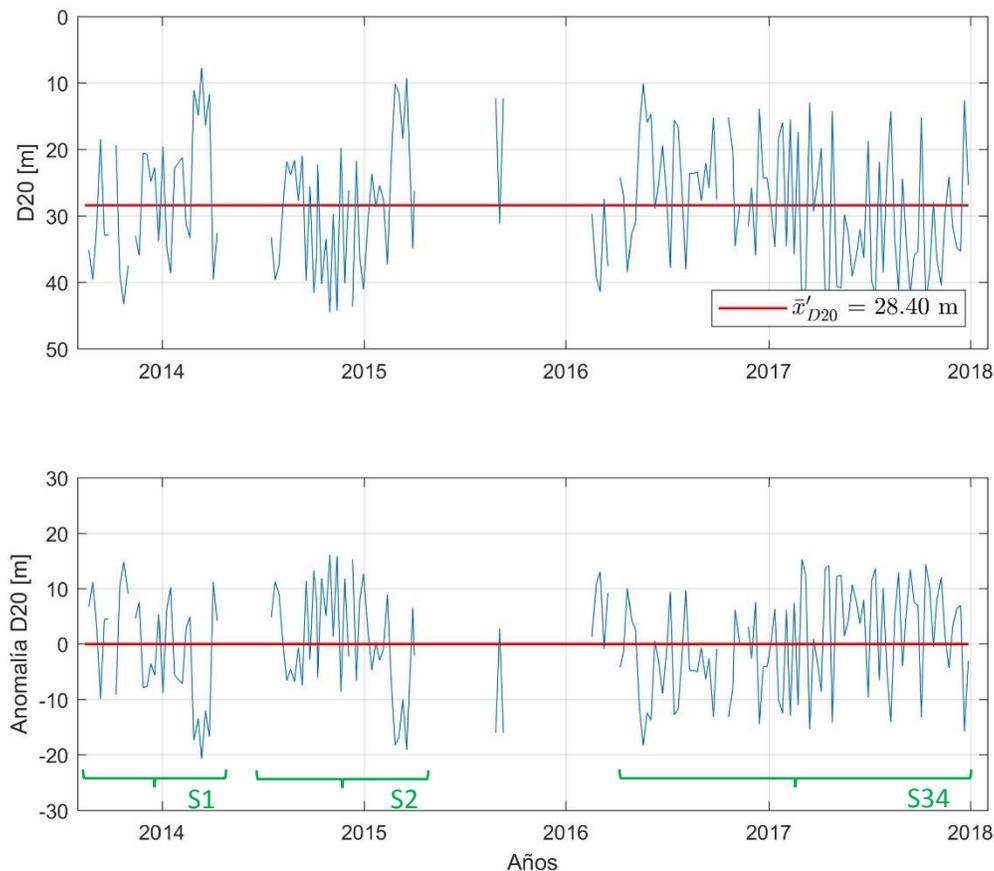


Figura 14. Profundidad de la isoterma de 20°C (D20, panel superior) y anomalía de D20 (panel inferior) de la estación oceanográfica de El Pelado. Los valores negativos (positivos) de anomalía de D20 se corresponden con condiciones cálidas-la termoclina se profundiza (condiciones frías-la termoclina se levanta).

A la serie de tiempo de anomalía de D20 se le fue aplicado el análisis espectral según el método de Welch (o Periodograma promedio, Thomson y Emery, 2014), usando para ello la transformada clásica de Fourier. La data de la serie de tiempo fue tratada según el siguiente procedimiento: (1) se

removió la energía de alta frecuencia aplicando un filtro de media-corrída (promedios móviles) con un peso de 3 días, (2) se identificó los segmentos de datos continuos de la anomalía de D20, (3) aquellos gaps que tengan una longitud menor o igual a 2 fueron rellenados con un interpolador lineal del tipo “spline”, de tal manera de contar con más segmentos de datos continuos; (4) se estableció una longitud de segmento común para este subset de datos (N=45 semanas o N=315 días); (5) se rellenó con ceros al inicio/fin del segmento si este no alcanza N=45 semanas.

Los segmentos de datos continuos elegidos fueron cuatro:

- S1: 22-8-2013 al 10-4-2014, N=34 semanas.
- S2: 17-7-2014 al 16-4-2015, N=42 semanas.
- S34: 8-4-2016 al 28-12-2017; N=91 semanas (este último segmento fue, a su vez, dividido en dos; para que cada sub-segmento tenga N=45 semanas).

Otros datos considerados para el análisis espectral son: periodicidad de muestreo (7 días), frecuencia de Nyquist (0.07 ciclos/día o 14 días), número de segmentos (4, para el periodograma promedio), grados de libertad (8).

Los resultados del análisis espectral se observan en la Figura 15, así como en la Tabla 5. La mayor proporción de energía (varianza) se ubica en las frecuencias bajas. Las periodicidades más energéticas se observaron en T=52.5 días y T=105 días. La aplicación del filtro de media-corrída (pasa-bajo) tuvo por efecto remover la energía de frecuencias más altas, las cuales debido a la cercanía de la frecuencia de Nyquist, estaban contaminadas por el efecto de enmascaramiento o “Aliasing” (Glover et al. 2011).

El pico en 52 días es consistente entre los 4 espectros individuales calculados. También, el pico de 105 días se replica (con un rango de frecuencias mayor) en los otros espectros individuales. Esta escala de variabilidad es la intraestacional, y se **correspondería** con la actividad de ondas de Kelvin ecuatoriales que se propagan desde el Pacífico occidental a lo largo del ecuador. Diversos trabajos han documentado la actividad de estas en los registros de nivel del mar y termoclina de la región: 50 días (Enfield 1987), 60 a 75 días (Kessler et al. 1995), 70 y 120 días (Cravatte et al. 2003), 40 a 70 días (Cedeño 2015). También son aproximadamente coincidentes con este estudio lo encontrado en Riofrío 2014 (D20 El Pelado): altos niveles de energía en 105 y 63 días (intraestacional).

El trabajo de Cravatte et al. 2003 indicó que las ondas de Kelvin de 70 días (120 días) corresponden al modo baroclínico más bajo que se propaga más rápido (~2.7 m/s); mientras que el de 120 días se relaciona con modos altos de onda que tienden a propagarse más lento (~1.25 m/s). Las ondas de Kelvin de modo alto (2do y 3er modo baroclínico) suelen jugar un rol importante en el Pacífico Oriental, en donde la termoclina es más somera (debido al afloramiento ecuatorial, al EUC, y a la lengua de agua fría del Pacífico Suroriental). Esto fue corroborado por Garcés et al. (2005), que identificó que la señal de contenido de calor se propaga secundariamente, a una velocidad entre 1 y 1.6 m/s, que son velocidades típicas de los modos altos de onda de Kelvin.

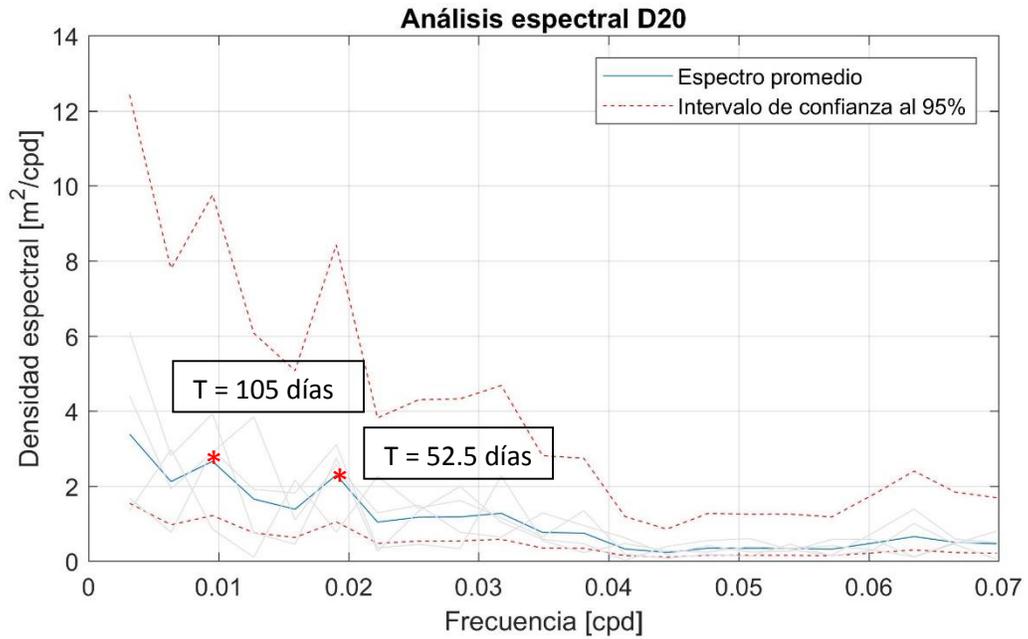


Figura 15. Espectro de densidad de varianza de la termoclina (D20). Años 2013-2014, 2014-2015 y 2016-2017. Se destacan los dos peaks más energéticos. cpd: ciclos por día.

armónico	freq [cpd]	T [días]	Px [m^2/cpd]	porc Px [0 a 1]
3	0.0095	105.0	2.66	0.11
6	0.0190	52.5	2.30	0.10

Tabla 5. Resultado del Análisis espectral de la termoclina (D20). Años 2013-2014, 2014-2015 y 2016-2017. Se muestran los picos de energía más destacados. Px = Densidad espectral.

Discusión y conclusiones

- Se definió un procedimiento para el procesamiento de la data de CTD, desde los datos “crudos” (archivos .CNV), hasta los datos “equiespaciados” cada 2 metros. Este proceso incluyó la aplicación de un filtro de media-corrída (pasa-bajo, peso del filtro igual a 5), así como una función de alineamiento de los datos de salinidad con temperatura (9 iteraciones).
- A la data “equiespaciada” cada 2 metros de temperatura y salinidad, le fue aplicado un control de calidad basado en diagramas de cajas. Para cada estrato (de 1 metro a 50 metros) y para todos los años (desde agosto-2013 a diciembre-2017), la propia muestra de los datos definió el diagrama de caja y sus valores estadísticos; incluyendo las marcas superiores e inferior que permiten calificar a los valores como atípicos. Los resultados permitió indicar 4 grupos de datos que no cumplieron con las condiciones “típicas”. Cuando la data fue revisada puntualmente, estos datos no presentaron mayores novedades (siendo explicados por la variabilidad de la termoclina en los límites superior e inferior de su rango, o porque la muestra se reduce en los estratos más profundos). El grupo 3 de datos atípicos (2-junio de 2016) si presentó una novedad mayor (fueron considerados bajo toda norma como “atípicos”), y debe ser revisado desde su origen.
- Los gráficos Hovmoeller de profundidad-tiempo, para temperatura y salinidad, permitieron re-visitarse ciertas características climatológicas identificadas en estudios previos (Riofrío 2014, valores de alta salinidad en toda la columna centrada en el mes de abril), así como la evolución de un evento El Niño (2015-16) y El Niño Costero (2017).
- Los altos valores de salinidad centrados en el mes de abril fueron relacionados con la reversa de primavera (boreal). Esto sucede a causa del debilitamiento estacional de (1) componente zonal de los vientos Alisios, que origina a su vez (2), una disminución en el momentum zonal, que es función también de una disminución de la actividad de las TIW (Harrison et al., 2001). La súbita aparición de esta reversa está asociada con una intensificación del flujo este de la Subcorriente Ecuatorial EUC; flujo que se extiende durante este evento, y que podría alcanzar la costa ecuatoriana (El Pelado), llevando consigo como característica más relevante la de altos valores de salinidad en toda la columna de agua. Dentro de los procesos oceánicos que rigen en la zona (ondas ecuatoriales, Frente Ecuatorial, corrientes), esta explicación resulta razonable, tomando en consideración el tiempo en el que se da (abril), así como que las corrientes, tanto como pueden adveccionar calor, pueden adveccionar sal (e.g., Recalde 2014).
- El evento El Niño de 2015-16 tuvo una gran influencia en la variabilidad de la termoclina, misma que se profundizó (más allá de los 50 m, máxima profundidad de la estación) durante los meses de abril-2015 a enero-2016. También fue posible observar la variabilidad asociada al arribo de ondas de Kelvin, y su influencia en la estructura térmica y halina. En la fase de hundimiento de la onda, esta profundiza la termoclina y la isoterma de 23.4°C (otro marcador hallado en este estudio). En la fase de afloramiento de la onda, levanta esta última isoterma. Si la onda tiene una gran amplitud, también alcanza a levantar la isoterma de 20°C (como lo sucedido durante agosto-septiembre de 2015).
- El evento de El Niño Costero de 2017 tuvo poca influencia en la variabilidad de la termoclina. A lo largo del período de ocurrencia de este evento, se observó la usual fluctuación de 20 días en la isoterma de 20°C, así como la influencia de la “reversa de primavera” en abril.

Esto se debió a que los eventos de El Niño Costero no están mediados por ondas ecuatoriales (Kelvin).

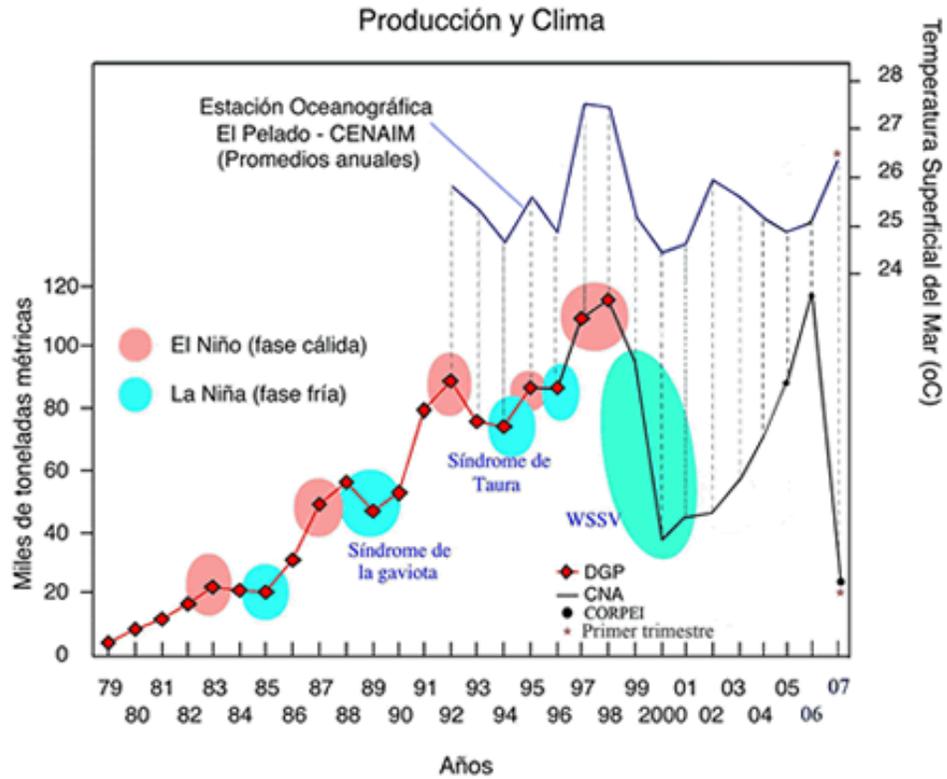
- El análisis espectral practicado a la termoclina (D20) permitió observar picos de energía en periodicidades de ~50 y ~100 días, los cuales son consistentes con ondas de Kelvin ecuatoriales de modo baroclínico bajo (~50 días) y altos (~100 días), los cuales son consistentes con trabajos previos (e.g., Cravatte et al. 2003, Riofrío 2014, Garcés et al. 2005).
- Junto con los altos niveles de energía en la banda intraestacional, Riofrío (2014) encontró picos en 14 y 35 días. A la luz del análisis presentado en este estudio, la energía del espectro en frecuencias cercanas a la Nyquist puede ser problemática, por lo que la identificación del pico de energía de 14 días (que lo relacionó con el armónico de marea quincenal M_2) es discutible (muy cercanos a la frecuencia del Nyquist).

Recomendaciones

- Se recomienda establecer un protocolo de procesamiento ordenado de los datos de CTD de la estación El Pelado, siguiendo el esquema documentado en este reporte. En conjunto con una iniciativa que permita su almacenamiento en una base de datos oceanográfica con todos los estándares de rigor.
- También es recomendable establecer un protocolo de difusión de resultados, tanto para la comunidad de usuarios interesada, así como para insumo del comité ERFEN (Estudio Regional del Fenómeno de El Niño). Actualmente, la información de la estación es posteada en las cuentas de redes sociales de CENAIM (Twitter y Facebook), pero no guardan una regularidad.
- Para la difusión de resultados, se puede establecer la página web de CENAIM (www.cenaim.espol.edu.ec) como fuente principal de información, y la página web de Monitoreo de eventos ENOS (www.enos.espol.ec) como su espejo.
- Al establecer un protocolo de procesamiento y almacenamiento, se requeriría re-visitar toda la data de El Pelado, para su procesamiento de acuerdo a las pautas establecidas.
- Este estudio se realizó en un período corto de tiempo (cinco años), lo cual no permitió el cálculo de una climatología (promedio largo). Al visitar la data de El Pelado, se puede obtener como resultado la climatología de la estación, obteniendo luego las anomalías, que nos permitirá ver con mejor detalle las variaciones fuera del promedio en eventos como El Niño y La Niña.
- Una forma de trabajar estos elementos puede ser (1) a través de una materia integradora de oceanografía, (2) solicitando ayuda técnica para el establecimiento de una database siguiendo los estándares oceanográficos de rigor. Estas instituciones podrían ser INOCAR (Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada), o la COI (Comisión Oceanográfica Intergubernamental), aprovechando el reciente establecimiento del RTC ESPOL (Centro de Entrenamiento Regional) bajo el proyecto Oceanteacher 2.
- Si va a ser mediante una Materia Integradora, se debe establecer un cliente (que podría ser el CENAIM), así como un producto por entregar (database implementada, servicio de difusión vía web de CENAIM y redes sociales). Recordando que las Materias Integradoras

son concretas y acotadas (el estudiante tiene 4 meses – un término académico para trabajarla).

- La isoterma de 23.4°C y la isohalina de 34.4 UPS resultaron interesantes marcadores de la termoclina en El Pelado (complementando con la isoterma de 20°C, ausente en eventos El Niño). Se podría realizar un experimento en el cual, a través de la estructura de densidad, se defina un marcador equivalente en T/S a la picnoclina, y luego definir mediante correlación cuál presenta mejores resultados.
- Si se revisita toda la data de El Pelado, sería posible extender a otros años el análisis espectral de la termoclina, usando para ello un espectro del tipo “Periodograma-Welch” (promedio), utilizando la transformada rápida de Fourier. Esto permitirá confirmar las periodicidades más energéticas de la serie.
- La frecuencia de muestro de la estación oceanográfica El Pelado (7 días) es apropiada para estudiar periodicidades mayores a 30 días, debido al efecto de enmascaramiento. Es recomendación (Holthuijsen 2007) fijar la frecuencia de Nyquist (y por ende, la frecuencia de muestreo) en 4 o 5 veces la frecuencia (periodicidad) de estudio. Si nuestra periodicidad de estudio es 30 días, dividido para 4, es igual a 7.5 días. Por lo que resolver frecuencias más altas requiere de una frecuencia de muestreo más alta también. Si es de interés del CENAIM el estudio de estas frecuencias, se debe elaborar otros experimentos, como el fondeo de una línea de termistores (que tienen una tasa de muestreo alta), o incrementar la tasa de muestreo de la estación. Para resolver apropiadamente un $T = 15$ días, se requiere un intervalo de muestreo de 3 días, y para un $T = 20$ días, el intervalo de muestreo debe ser 5 días.
- Una forma inclusive más interesante de analizar el espectro de la termoclina sería a través de un análisis Wavelet, que permite ver la evolución del espectro en el tiempo. Se recomienda su implementación.
- Otros eventos que faltan ser caracterizados en el período de estudio son: El Niño 2014 (suele ser considerado como una extensión de El Niño 2015-16), y La Niña que le siguió a continuación (2016-17). Aunque este último evento se superpone a El Niño Costero en el Pacífico Oriental.
- Aunque es claro el valor que tiene la estación de El Pelado como estación de monitoreo oceanográfica bien establecida en el tiempo, es posible aumentar el perfil de su uso y aplicaciones en sectores como riesgo, agricultura/ganadería, acuicultura y pesca. En años anteriores, por ejemplo, se estudiaba las relaciones existentes entre la temperatura superficial del mar y la producción acuícola (ver Figuras 16 y 17), la cual generaba buenos índices de correlación. ¿Son ahora los cultivos de camarón menos dependientes del clima? ¿Cuánto ha variado esta relación en años recientes, a partir del año 2007? ¿Cómo durante los eventos de El Niño Modoki se modifica la producción camaronera? Estas quizás son preguntas que podrían abordarse como un estudio de ciencia aplicada, altamente relevante en estos tiempos en los cuales el camarón es el producto de exportación no-petrolero más importante del Ecuador.



Elaboración: Chavarría J. y B. Bayot

Fuente de datos:
 CENAIM Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas
 DGP Dirección General de Pesca
 CNA Cámara Nacional de Acuicultura (www.cna-ecuador.com)
 CORPEI (www.corpei.org)

Figura 16. Relación entre la variabilidad climática ENSO y la producción de camarón de exportación en el Ecuador. Fuente: Chavarría y Bayot (2007).

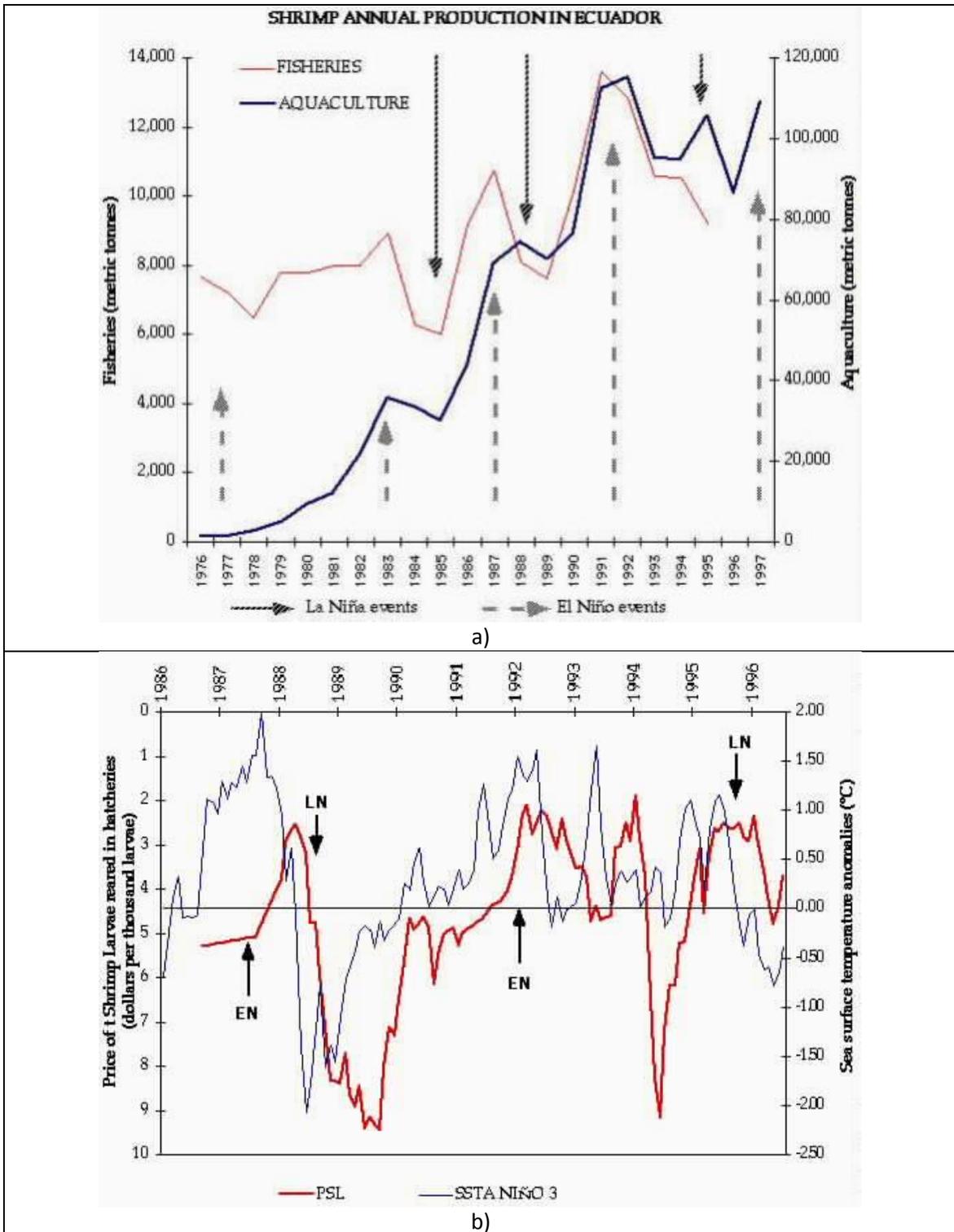


Figura 17. Relación entre la variabilidad climática en la costa de Ecuador, y algunos índices de pesquerías y acuicultura. a) Producción de camarón y pesquerías [toneladas métricas] y el impacto de los eventos El Niño/La Niña. b) Precio de la larva de camarón (como proxy de la disponibilidad de la larva de camarón), y el índice Niño 3 (anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico Oriental). Fuente: Cornejo-Rodríguez (2000).

Bibliografía

- Bartlett K. (2021). find_cond_advance (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21660-find_cond_advance), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 9, 2021.
- Bayot B. (2010). ACUICLIMA Acuicultura y Clima. Información del CENAIM de la estructura térmica subsuperficial del mar en el Islote El Pelado y proyección climática para productores camaroneros del Ecuador. Disponible en: <http://blog.espol.edu.ec/cenaim/category/estacion-oceanografica/>
- Clarke A.J. (2008). An introduction to the dynamics of El Niño and the Southern Oscillation. 308 pp. Academic Press, London.
- Cedeño J. (2015). Variabilidad interanual de las ondas intraestacionales de Kelvin en el Pacífico Ecuatorial Este. Tesis, Magister en ciencias con mención en Oceanografía. Universidad de Concepción, Chile. Concepción.
- Chavarría J. y B. Bayot (2007). La influencia del clima en la producción camaronera. Producción y clima. ACUICLIMA-CENAIM. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20100221015038/http://www.cenaim.espol.edu.ec/acuiclim/clima.html>
- Cornejo-Rodríguez M.P. (2000). Ecuador country report. En: Michael H. Glantz (Ed). Reducing the Impact of Environmental Emergencies through Early Warning and Preparedness: The Case of the 1997-98. UNEP/NCAR/UNU/WMO/ISDR. Disponible en: <https://archive.unu.edu/env/govern/EINiño/CountryReports/inside/ecuador.html> y <https://archive.unu.edu/env/govern/EINiño/CountryReports/pdf/ecudour.pdf>
- Cravatte S., J. Picaut y G. Eldin (2003). Second and first baroclinic Kelvin modes in the Equatorial Pacific at intraseasonal timescales. J. Geophys. Res. 108(C8), 22-1:22-20.
- Cucalón E. (1983). Temperature, Salinity and Water Masses Distribution off Ecuador during an El Niño Event in 1976. Rev. Cien. Mar. Limnol. 2(1):1-25.
- Echevin V., F. Colas, D. Espinoza-Morriberon, L. Vasquez, T. Anculle y D. Gutierrez (2018). Forcing and evolution of the 2017 coastal El Niño off northern Peru and Ecuador. Front. Mar. Sci., 5:367. DOI: 10.3389/fmars.2018.00367
- Enfield D.B. (1987). The Intraseasonal oscillation in Eastern Pacific Sea Level: how is it forced? J. Phys. Oceanogr. 17, 1860:1876.
- Garcés-Vargas J., W. Schneider, R. Abarca del Río, R. Martínez y E. Zambrano (2005). Inter-annual variability in the thermal structure of an oceanic time series station off Ecuador (1990 a 2003) associated with El Niño events. Deep Sea Res. I, 52(10), 1789-1805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.05.008>
- Garreaud R.D. (2018). A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. Int. J. Climatol, 38: e1296-e1302. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5426>

Ger G. y G. Torres (2018). Reporte de datos – islote El Pelado. Reporte Técnico del curso de Oceanografía de la Región Ecuatorial 2018, 1er Término académico. Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL. Guayaquil.

Glover D. (2011). Modeling Methods for Marine Science. Cambridge University Press. 588pp.

Harrison D.E., R.D. Romea y G.A. Vecchi (2001). Central equatorial Pacific zonal currents. II: The seasonal cycle and the boreal spring surface eastward surge. J. Marine Res. 59(6), 921-948. DOI: 10.1357/00222400160497715

Holthuijsen L.H. (2007). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge. 387pp.

Kessler W.S., M.J. McPhaden y K.M. Weickmann (1995). Forcing of intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. J. Geophys. Res. 100, 10613:10631.

Ormaza-González F. y J. Cedeño (2017). Coastal El Niño 2017 or Simply: The Carnival Coastal Warming Event? MOJ Eco. Environ. Sci., 2(8):00054. DOI: 10.15406/mojes.2017.02.00054

Recalde S. (2014). Variación estacional de la salinidad de la capa de mezcla en una estación costera del Pacífico Ecuatorial Oriental. Tesis, Magister en ciencias con mención en Oceanografía.

Universidad de Concepción, Chile. Concepción. Disponible en:

http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/1600/1/Tesis_Variacion_Estacional_de_la_salinidad_de_la_capa_mezcla.Marked.pdf

Riofrío M. (2004). Caracterización termohalina de la estación oceanográfica El Pelado. Tesis, Oceanografía. Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL. Guayaquil. Disponible en:

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1564/1/3054.pdf>

Sontek-YSI (2021a). Castaway CTD Manual. Accedido el 2021-03-08. Disponible en:

https://www.fondriest.com/pdf/ysi_castaway_manual.pdf

Sontek-YSI (2021b). Castaway CTD brochure. Accedido el 2021-03-08. Disponible en:

<https://www.sontek.com/media/pdfs/castaway-ctd-web.pdf>

Takahashi K. (2004). The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997--1998 and 2002 El Niño events. Annales Geophysicae, 22(11), 3917-3926.

DOI: 10.5194/angeo-22-3917-2004

Takahashi K. y Martínez A.G. (2019). The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. Clim. Dyn., 52, 7389-7415. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>

Thomson R.E. y W.J. Emery (2014). Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier Science. 728pp.

UNESCO (1991). Processing of oceanographic station data. Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards JPOTS. Paris. 138pp. Disponible en:

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000090489>

Woodman R. (2005). Modelo estadístico de pronóstico de las precipitaciones en la costa norte del Perú. Volumen especial No. 6. Alberto Giesecke Matto. Sociedad Geológica del Perú.

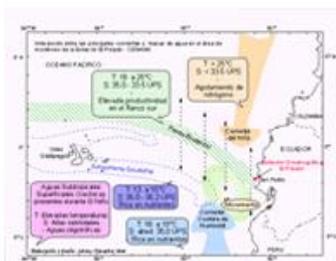
Yu X. y M. J. McPhaden (1999b). Dynamical analysis of seasonal and interannual variability in the equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2350–2369. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2350:DAOSAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2350:DAOSAI>2.0.CO;2)

Anexo 1

Estación Oceanográfica El Pelado, según la página web “Acuiclima”, funcional hasta mediados del año 2010. Disponible en:

<https://web.archive.org/web/20100221015638/http://www.cenaim.espol.edu.ec/acuiclim/laestacion.html>

Estación Oceanográfica El Pelado	
Posición geográfica	Latitud: 01° 55' 53" S Longitud: 80° 46' 55" W
Referencias geográficas	0.5 millas (aproximadamente) al suroeste del <i>Islote El Pelado</i> . 5 millas al oeste de San Pedro de Manglaralto, Provincia del Guayas.
Parámetros medidos	Físicos: temperatura, salinidad, disco Secchi, color. Meteorológicos: pluviosidad, temperatura y otros (Estación Meteorológica San Pedro) Químicos: oxígeno disuelto, fósforo reactivo, amonio, nitrato, silicato Biológicos: fitoplancton, zooplancton
Algunos parámetros se miden ocasionalmente	
Frecuencia de mediciones	Semanal
Tipo de medición	Perfil vertical hasta 40 m
Equipos utilizados	CTD: ALEC Electronics ADR 1000 YSI-85 Oxigenómetro Sea Cat 19 Profiler SBE



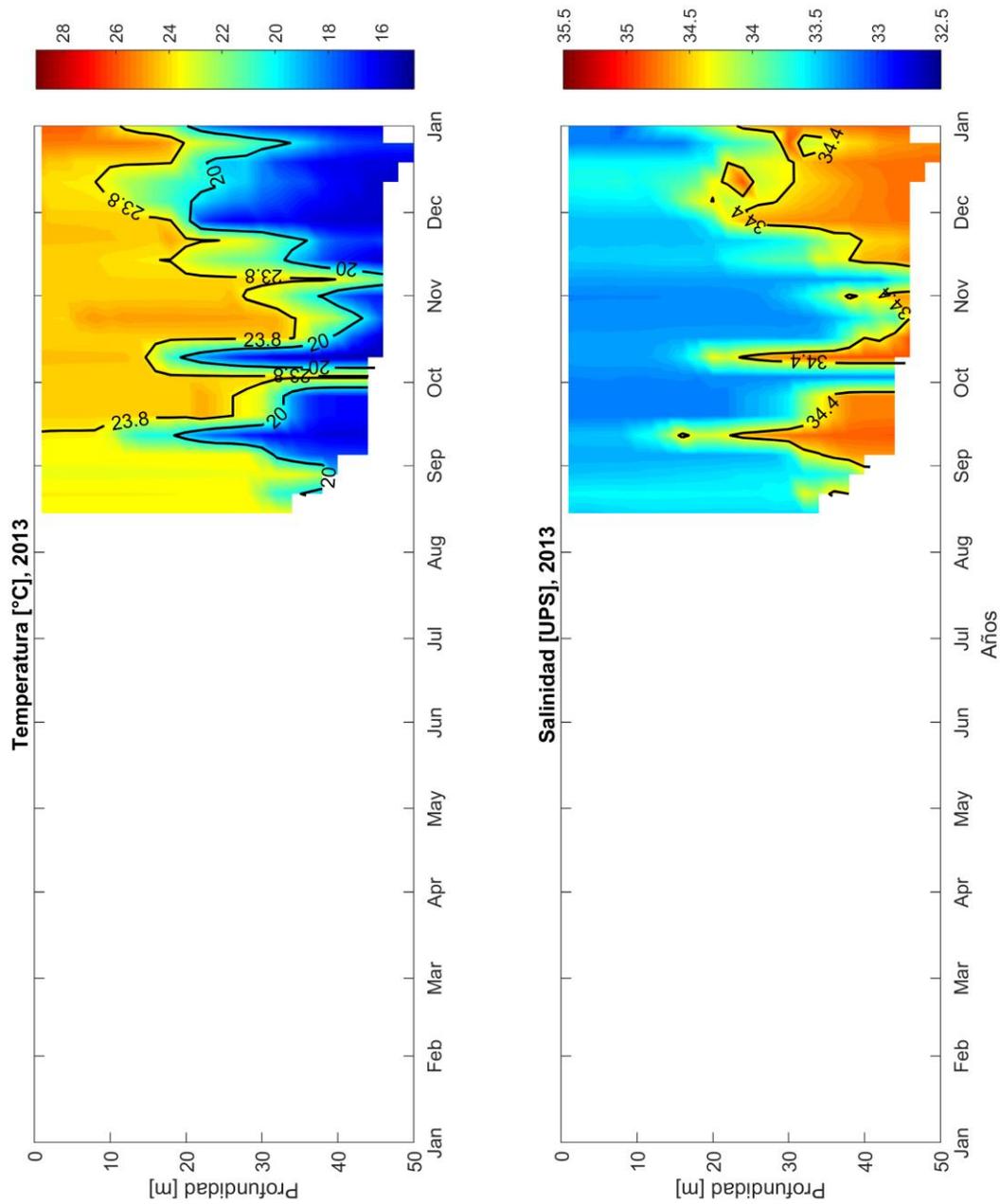
(Hacer click para ampliar)

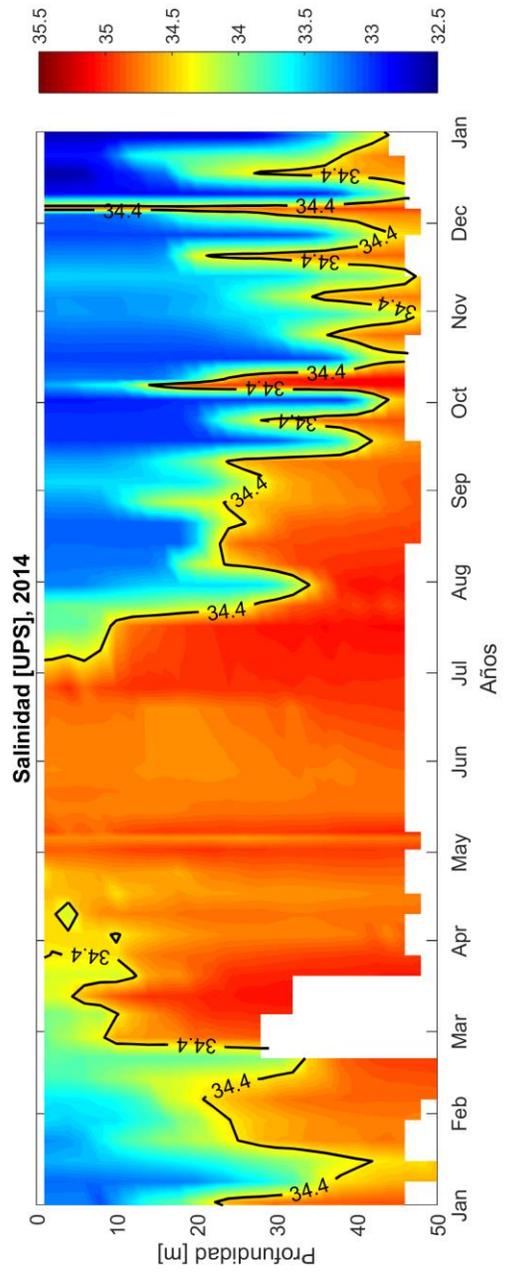
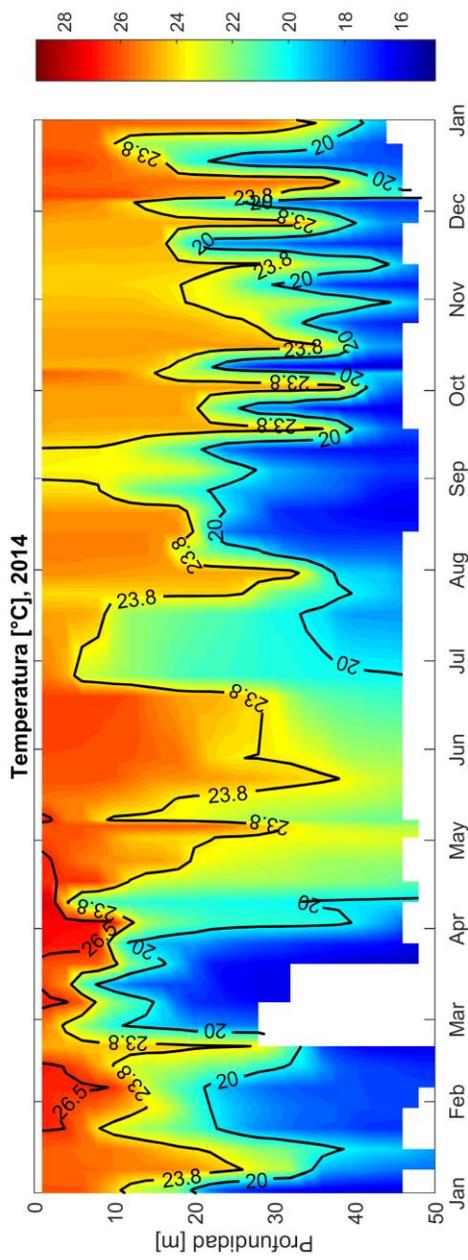


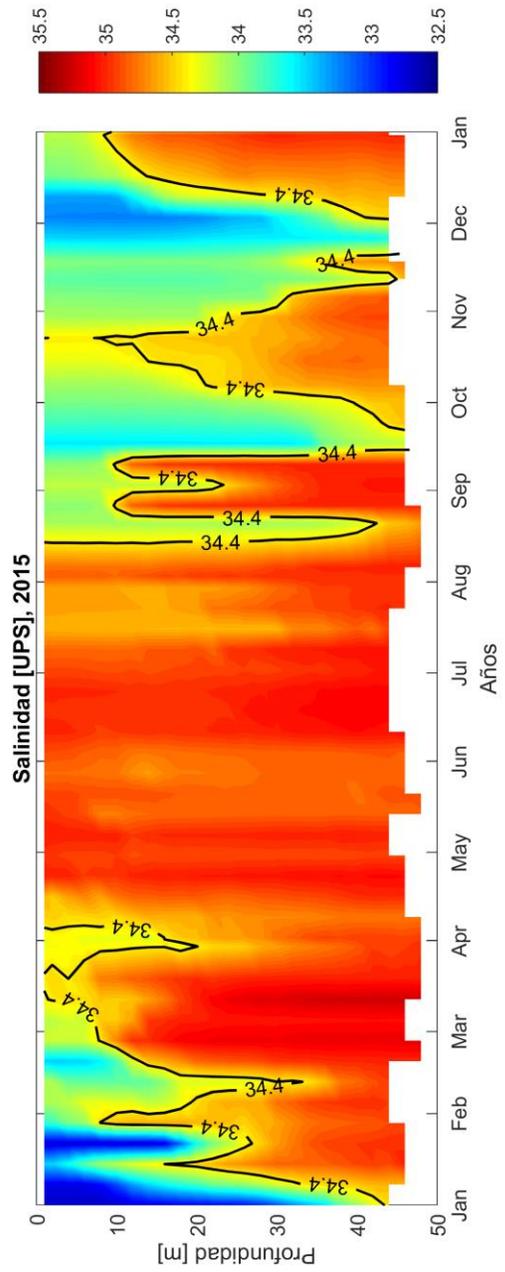
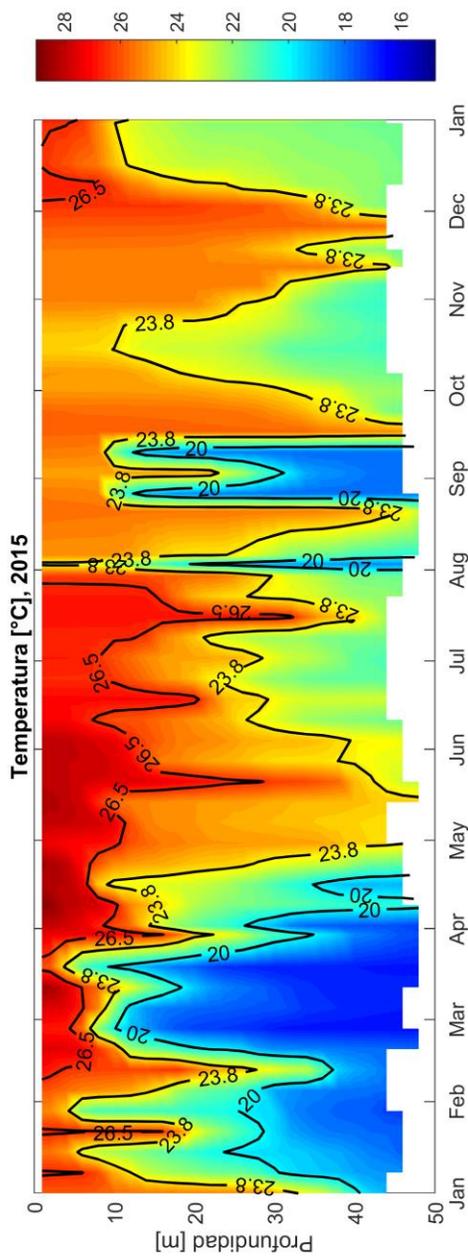
El CENAIM mantiene desde 1992 una estación semanal de monitoreo ambiental en las cercanías del islote El Pelado, ubicado a 5 millas frente a sus instalaciones en San Pedro de Manglaralto - Ecuador. La Estación realiza un seguimiento permanente de la estructura termohalina subsuperficial hasta 40 metros de profundidad, en una zona donde la interacción de varias masas de agua regulan el clima local en distintas escalas de tiempo, influenciando los ecosistemas marinos del área.

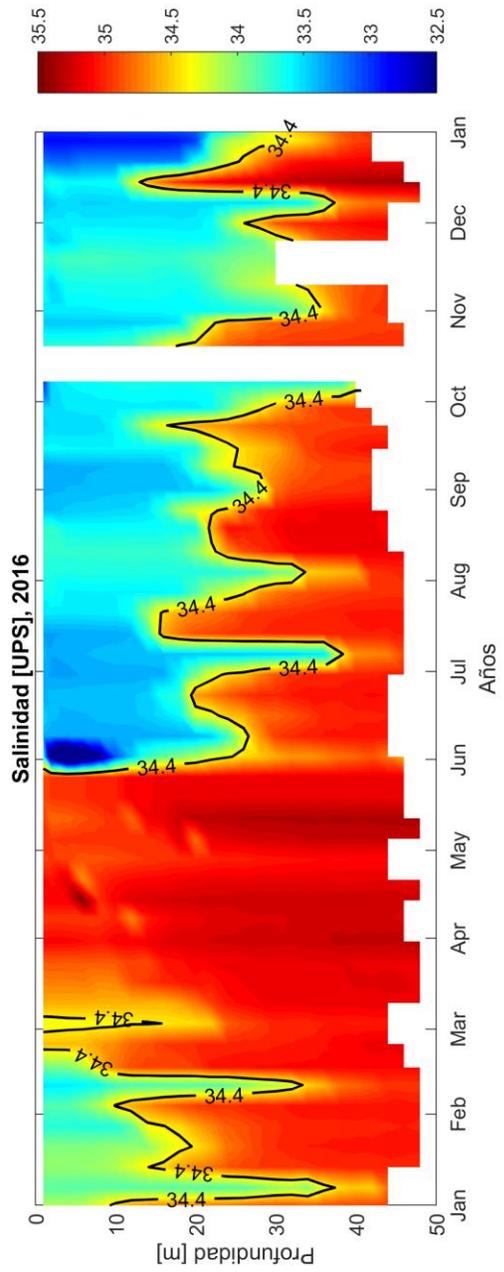
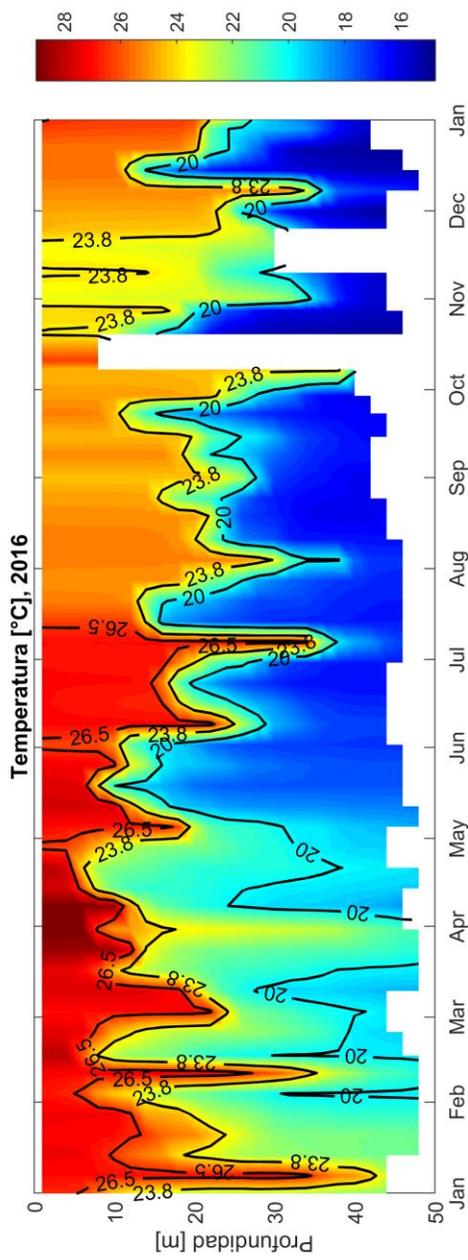
Anexo 2

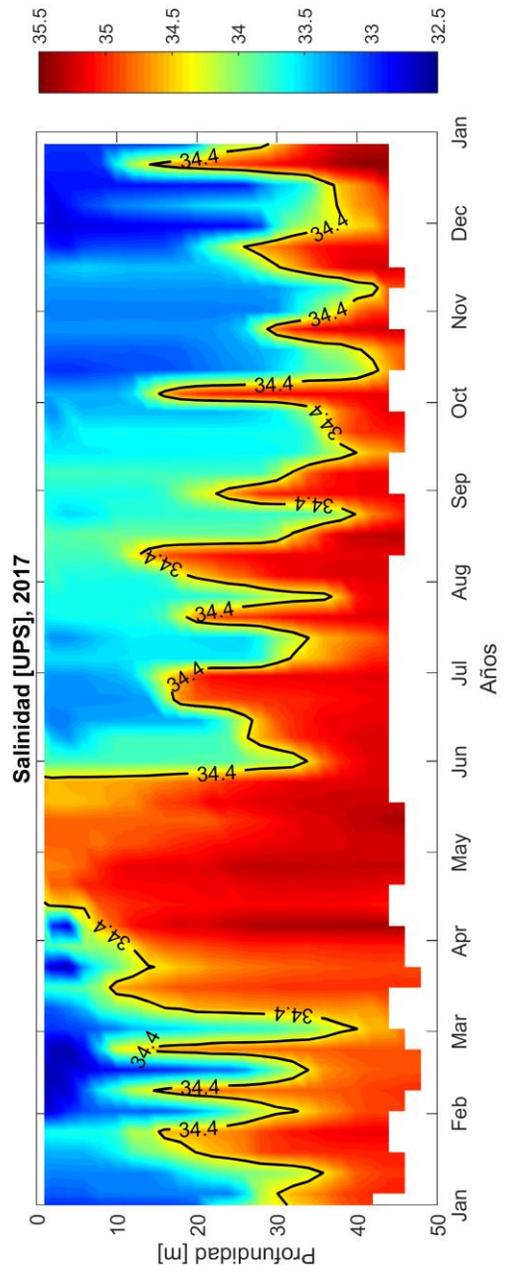
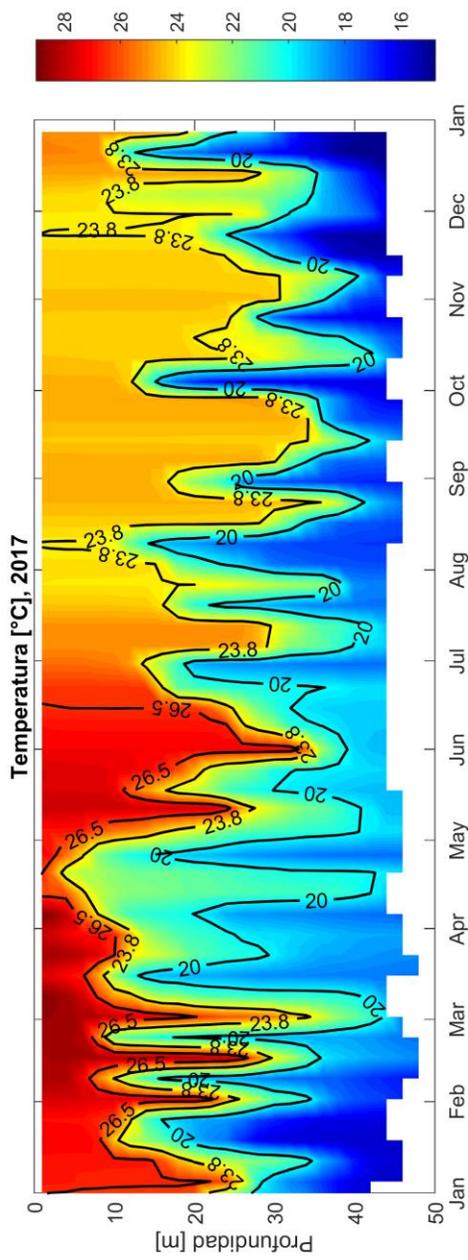
Gráficos Hovmoeller de profundidad-tiempo temperatura/salinidad para cada uno de los años entre 2013 y 2017.











Anexo 3

Procedimiento de toma de datos con el equipo Sontek-YSI Castaway CTD. Fuente: Ger y Torres (2018), Sontek-YSI (2021a).

Metodología

Instrumento

Antes de explicar los procedimientos aplicados en la medición de datos en la columna de agua, es importante resaltar las características del instrumento usado para la toma de datos que es este caso fue CTD CastAway.

El CTD CastAway es un instrumento de perfilado que permite medir conductividad, temperatura y presión. Instrumento pequeño, robusto y técnicamente avanzado. Su diseño le permite llegar a profundidades de hasta 100 metros, así como mediciones de puntos en superficie. El instrumento incorpora características técnicas avanzadas que le permiten lograr un tiempo de respuesta de 5 Hz, resolución espacial fina y alta precisión. Utiliza una celda de conductividad de flujo de seis electrodos con cero campo externo acoplado con un termistor de respuesta rápida para alcanzar altas exactitudes de medición. La pantalla de visualización LCD integrada, el sensor GPS interno y la transferencia automática de datos inalámbricos son características únicas que simplifican la recopilación de datos y el proceso de análisis. El uso del instrumento es muy sencillo en comparación a otros CTD, no requiere una bomba y está diseñado hidrodinámicamente para una tasa de caída libre de 1 m/s.³



Figura 1: CTD CastAway
(SonTek, 2011)

Según (SonTek, 2011) atribuye varias especificaciones que hacen único el CTD, dadas sus características; sin embargo, las especificaciones más importantes desde nuestro punto de vista son⁴:

- Comunicación: Bluetooth clase II, hasta 10 m de alcance
- Energía: 2 pilas alcalinas "AA", 40 horas de uso continuo
- Formato de salida de datos: ASCII (CSV), Hypack y Matlab
- Finalmente la precisión y rangos que maneja el CTD:

Diego, S. (2012). User ' s Manual 1 . 5 Software Version 1 . 5, 1(January).

SonTek. (2011). The CastAway- CTD with profiling and analysis software (S13-03). *YSI Incorporated*, 1–2. Retrieved from

³ Diego, S. (2012). User ' s Manual 1 . 5 Software Version 1 . 5, 1(January).

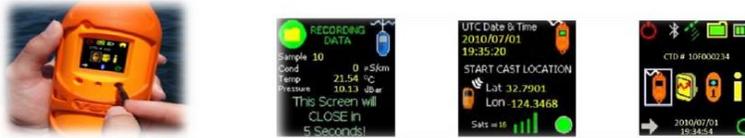
⁴ SonTek. (2011). The CastAway- CTD with profiling and analysis software (S13-03). *YSI Incorporated*, 1–2. Retrieved from <http://www.sontek.com/productsdetail.php?CastAway-CTD-11>

Tabla 1: Parámetros de salida del Parámetros de salida del CTD CastAway (SonTek, 2011)

Variables	Rango	Resolución	Presición
Conductividad	0 a 100000 $\mu\text{S/cm}$	1 $\mu\text{S/cm}$	$\pm 0.25\% \pm 5 \mu\text{S/cm}$
temperatura	desde -5° a 45°C	0.01 $^\circ \text{C}$	$\pm 0.05^\circ \text{C}$
Presión	0 a 100 dBar	0.01 dBar	$\pm 0.25\% \text{FS}$
Salinidad	hasta 42 ppm	0.01 ppm	$\pm 0.1 \text{ppm}$
Velocidad del sonido	1400-1730 m/s	0.01m/s	$\pm 0.15 \text{m/s}$
Densidad	990 a 1035 kg/m^3	0.004 kg/m^3	$\pm 0.02 \text{kg/m}^3$
Profundidad	0 a 100 m	0.01 m	$\pm 0.25\% \text{FS}$
Conductividad específica	0 a 250000 $\mu\text{S/cm}$	1 $\mu\text{S/cm}$	$\pm 0.25\% \pm 5 \mu\text{S/cm}$
GPS			10 m

Toma de datos

La toma de datos, en el punto de estudio se realiza de la siguiente manera según menciona (Diego, 2012) en su manual.



[1] Encender el equipo.

[2] Presione () para resaltar el icono de transmisión CTD () y luego presione () para ejecutar esta función. Luego grabar la posición inicial del GPS (Coordenadas). Los iconos en la parte inferior de la pantalla LCD (más el LED de estado) muestran la calidad de los datos de ubicación GPS.

- () Sin posición de GPS (LED rojo parpadeante)
- () Posición GPS de baja calidad (LED amarillo intermitente)
- () Posición GPS de alta calidad (LED verde sólido)

[3] Luego ejecute (), como se hizo en el paso [2], aquí se mostrará una pantalla de datos de grabación para indicar que la recolección de datos está comenzando. Donde el LED verde parpadeante indica que el sistema está activo recolectando datos de CTD.

[4] Luego el CTD se ubica justo debajo de la superficie del agua durante aproximadamente 10 segundos. Esto permite que los sensores CTD se establezcan en las condiciones del agua superficial. Posteriormente permita que el CTD caiga libremente al fondo, no más allá de 100 metros, ya que el equipo podría dañarse. Como recomendación en este paso, considere que la cuerda con la que se sumerge el equipo tendrá cierto grado de inclinación con la vertical por lo que se sugiere dar un metro o dos de gracia para alcanzar la profundidad requerida.

[5] Antes y después de que el CTD llegue al fondo, el equipo debe manejarse a una velocidad constante de aproximadamente 1 m / s. Para obtener un mejor calidad de datos, no se detenga durante el lanzamiento hacia abajo o hacia arriba lo que ayudará a evitar los llamados “spikes” o saltos del perfil producidos por las diferentes velocidades de respuesta de cada uno de los sensores. Cuando termine, presione cualquier botón para finalizar la recolección de datos de CTD.

[6] Después del lanzamiento, puede comprobar que el equipo tomó datos, observando la gráfica de los mismos. Con el botón inferior derecho de CastAway puedes desplazarte por las gráficas de perfil de los datos recopilados para el punto de estudio, tal y como se muestra en la figura (5).⁵

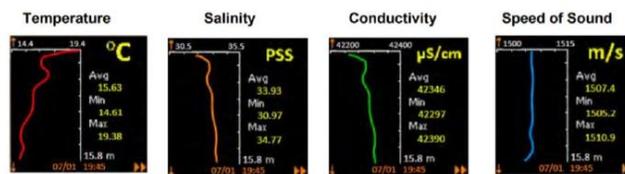


Figura 2: Perfiles obtenidos de la toma de datos (Diego, 2012)

Procedimiento para lectura de datos del CTD

Paso [1]

```
>> [ctdr,ctdi]=readctd_castaway('W01_20180609_162043.csv');
```

Paso [2]

```
>> pi=ctdi(:,1);ti=ctdi(:,2);si=ctdi(:,3);
>> pr=ctdr(:,1);tr=ctdr(:,2);sr=ctdr(:,3);
```

Paso [3]

```
>> Ci=gsw_C_from_SP(si,ti,pi);%[mS/cm]
>> Cr=gsw_C_from_SP(sr,tr,pr);%[mS/cm]
```

Paso [4]

```
>> [bestAdv,s2i] = find_cond_advance(ti,Ci/10,pi,-4,4,'showprogress','yes');
>> [bestAdv,s2] = find_cond_advance(tr,Cr/10,pr,-4,4,'showprogress','yes');
```

Paso [5]

```
>> plot(ti,-pi,'b-'); xlabel('Temperatura (°C)'), ylabel('Profundidad(m)'),title('Perfil Profundidad vs Temperatura')
>> plot(s2i,-pi,'r-'); xlabel('Salinidad (ups)'), ylabel('Profundidad(m)'),title('Perfil Profundidad vs Salinidad')
```

⁵ Diego, S. (2012). User 's Manual 1 . 5 Software Version 1 . 5, J(January).

-La función **[ctdr,ctdi]=readctd_castaway** (fname), te permite obtener un conjunto de datos interpolados a partir de una data cruda, la interpolación se realiza según las necesidades del investigador; sin embargo, para este informe se interpoló cada 0,5 metros.

El procedimiento lo realiza tomando el archivo que contiene la data en formato csv, para ser específico las columnas que contienen la información de profundidad, temperatura y salinidad generando una matriz 96x3 denominada ctdr, para luego interpolarlas cada 0.5 metros obteniendo así otra matriz de 57x3 (nótese la disminución en la cantidad de datos) denominada ctdi.

Una vez obtenidas la matrices ctdr y ctdi se procede a separar cada una de las variables; es decir, las 3 columnas que conforman las matrices tanto para los datos normales, como para los interpolados.

-Luego la función **gsw_C_from_SP** calcula la conductividad interpolada y normal (Ci y Cr) de Practical Salinity (SP) a valores dados de temperatura in situ (°C, ITS-90) y presión (presión del mar, dbar) utilizando el algoritmo de Practical Salinity Scale de 1978 (PSS)-78, para valores de Salinidad Práctica mayor que 2, y una modificación del algoritmo PSS-78 para valores de Salinidad Práctica menores que 2.

-Posteriormente se usa la función **find_cond_advance** que requiere de (Conductividad [S/m], Temperatura[°] y Profundidad [db]) como variables para su ejecución, tal rutina encuentra el perfil óptimo de salinidad en la cual los spikes son minimizados, como se explicó anteriormente spikes se producen por la ligera diferencia que hay entre la lectura de la T y la S (debido a las diferentes velocidades de respuesta de cada uno de los sensores). Corregir estos saltos es generalmente llamado "alineación". Se alinea el perfil de salinidad con el de temperatura. Aquí se debe tener en cuenta que los valores de salida de la conductividad de la función **gsw_C_from_SP** se dan en unidades de mS/cm (no S/m) por ello se debe realizar la transformación de tal unidad Ci/10 y Cr/10.

Finalmente se grafican la imágenes, de temperatura y salinidad con la función plot

Anexo 4.

Lista de estudiantes.

Curso de Oceanografía Física 2020, 1er Término académico.

sec	nombre	correo	matricula
1	BUSTOS OÑA,ANGELICA MARIA	ambustos	201803699
2	CAMPOS PARRA,DOMÉNICA ALEJANDRA	docaparr	201706066
3	CHICA CAMPOZANO,CARLOS EDUARDO	cechica	201509755
4	CHICAIZA MANTILLA,SIZA LIBERTAD	sizcmant	201706074
5	COELLO GARNICA,DOMENICA NARCISA	dncoello	201602455
6	DELGADO ROMERO,PAULA ANNABELL	paudrome	201713161
7	FERNANDEZ BUSTAMANTE,MIRIAM DANIELA	mdfernan	201509795
8	INTRIAGO BASURTO,ANALIA	anaintri	201614633
9	LEON SHUNTA,JUAN CARLOS	juacleon	201615200
10	MENDOZA CAMINO,KELLY DENISSE	kdmendoz	201609484
11	MONTENEGRO GARCIA,VIVIAN NICOLE	vinimont	201612991
12	OCAÑA BALCAZAR,KEVIN DANILO	kdocana	201402537
13	OYERVIDE SAENZ,TANYA MARCELA	toyervid	201701984
14	PALATE CAGUA,JESSICA ALEXANDRA	jpalate	201604873
15	PIGUAVE TARIRA,ELVIS JOEL	elvjopig	201305046
16	PORTILLA DIAZ,ARCELIA HAYLEM	arcpdiaz	201612959
17	RODRIGUEZ LARA,NATHALIE LISSETTE	nlrodrig	201710365
18	SALAZAR VENTURA,ILIANA NOEMI	ilsavent	201712874
19	SANCHEZ OLVERA,ALLISON MELANNIE	allmesan	201504622
20	SANUNGA LOAYZA,JOSELINE NICOLLE	jornisan	201803228
21	SARMIENTO TAPIA,JOHARA ELVIRA	johelsar	201501116
22	SOLORZANO RUIZ,YUNESKI FERNANDA	yufesolo	201706157
23	SUMBA SUMBA,FLOR CAROLINA	fcsumba	201603347
24	TORO YEROVI,ELISA BEATRIZ	etoro	201706165
25	TORRES CEDEÑO,LOYDA DAMARIS	ldtorres	201701570
26	ZAMBRANO GALEANO,ANDREA CAROLINE	andczamb	201504241

Curso de Análisis de Información Oceanográfica 2020, 2do Término académico.

sec	nombre	correo	matricula
1	BUSTOS OÑA,ANGELICA MARIA	ambustos	201803699
2	CAMPOS PARRA,DOMÉNICA ALEJANDRA	docaparr	201706066
3	CHICA CAMPOZANO,CARLOS EDUARDO	cechica	201509755
4	CHICAIZA MANTILLA,SIZA LIBERTAD	sizcmant	201706074
5	COELLO GARNICA,DOMENICA NARCISA	dncoello	201602455
6	DELGADO ROMERO,PAULA ANNABELL	paudrome	201713161
7	FERNANDEZ BUSTAMANTE,MIRIAM DANIELA	mdfernan	201509795
8	INTRIAGO BASURTO,ANALIA	anaintri	201614633
9	LEON SHUNTA,JUAN CARLOS	juacleon	201615200
10	MENDOZA CAMINO,KELLY DENISSE	kdmendoz	201609484
11	MONTENEGRO GARCIA,VIVIAN NICOLE	vinimont	201612991
12	OCAÑA BALCAZAR,KEVIN DANILO	kdocana	201402537
13	OYERVIDE SAENZ,TANYA MARCELA	toyervid	201701984
14	PALATE CAGUA,JESSICA ALEXANDRA	jpalate	201604873
15	PORTILLA DIAZ,ARCELIA HAYLEM	arcpdiaz	201612959
16	RODRIGUEZ LARA,NATHALIE LISSETTE	nlrodrig	201710365
17	SALAZAR VENTURA,ILIANA NOEMI	ilsavent	201712874
18	SANCHEZ OLVERA,ALLISON MELANNIE	allmesan	201504622
19	SANUNGA LOAYZA,JOSELINE NICOLLE	josnisan	201803228
20	SARMIENTO TAPIA,JOHARA ELVIRA	johelsar	201501116
21	SOLORZANO RUIZ,YUNESKI FERNANDA	yufesolo	201706157
22	SUMBA SUMBA,FLOR CAROLINA	fcsumba	201603347
23	TORO YEROVI,ELISA BEATRIZ	etoro	201706165
24	TORRES CEDEÑO,LOYDA DAMARIS	ldtorres	201701570
25	ZAMBRANO GALEANO,ANDREA CAROLINE	andczamb	201504241