

Observaciones de corrientes en el Parque Nacional de Cabo Pulmo, Baja California Sur: mediciones Eulerianas en verano, otoño e inicios del invierno

Armando Trasviña Castro^{1*}, Octavio Aburto Oropeza², Exequiel Ezcurra³, Oleg Zaytsev⁴

¹CICESE, Unidad La Paz, La Paz, BCS, México 23050, ²Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92093,

³UC MEXUS, University of California Riverside, CA 9252, ⁴CICIMAR-IPN, La Paz, BCS.

* En estancia sabática en el Departamento de Biología Marina, UABCS, La Paz, BCS.

RESUMEN

Se reportan resultados de de observaciones de corrientes efectuadas entre octubre de 2010 y febrero de 2012 en el Parque Nacional de Cabo Pulmo, Baja California Sur, México. Los resultados confirman que existen corrientes costeras debidas a las contribuciones de la marea, del viento y de estructuras de mesoescala, estas últimas relacionadas con la circulación de la entrada al Golfo de California. Las corrientes tienen una circulación neta y estudiamos sus cambios en el año a través de diagramas de desplazamiento para cada sitio de observación. Estos diagramas se interpretan solo como persistencia del flujo. Durante otoño e invierno, y en ocasiones también en verano, los desplazamientos netos son hacia el sur. Los desplazamientos hacia el norte del sitio de observación se relacionan con un evento de vientos del sureste en octubre del 2011. La dominancia de los desplazamientos hacia el sur se atribuye a la importancia de los vientos del noroeste para determinar la circulación costera de Cabo Pulmo y, en general, para toda la entrada al Golfo de California.

INTRODUCCION y ANTECEDENTES

El lugar donde realizamos este estudio es la plataforma continental del Parque Nacional de Cabo Pulmo (entre la zona de rompiente del oleaje y el mar abierto en la cota de 200 m de profundidad), en el extremo sur de la península de Baja California. En esta zona las corrientes se deben principalmente a la influencia del viento y la marea. Es importante destacar que en este trabajo no incluimos estudios de la zona de la rompiente, ni entre la rompiente y la playa. Allí, la circulación y el transporte litoral de arena se deben a la interacción del oleaje con el fondo y con la línea de costa, y las metodologías para su estudio son muy distintas a las que usamos aquí.

El parque está situado en el extremo sur de la Península de Baja California, en la costa del Golfo de California, a una latitud tropical (23.5° N, Fig. 1). No obstante esta localización, las condiciones oceanográficas no siempre son cálidas y es usual encontrar condiciones subtropicales parte del año. Ello se debe a que el Parque se encuentra en la región oceanográfica transicional de la entrada al Golfo de California. Esta región tiene influencia de las aguas cálidas del Golfo de California y del Pacífico tropical mexicano, pero también llegan aguas frías de la Corriente de California (Castro et al., 2006). Por consiguiente, se pueden esperar cambios estacionales en los ensambles de organismos pelágicos que se acercan a este parque marino.

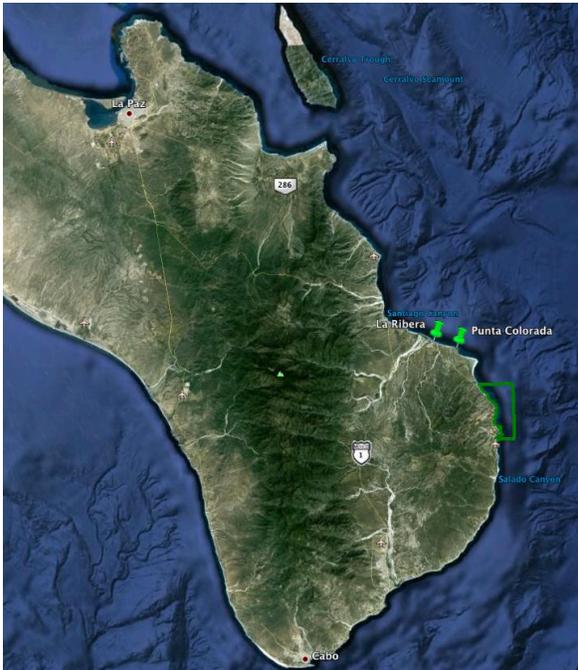


Figura 1. Izquierda: localización de la zona de estudio en el Golfo de California (mapa de Google Earth). La poligonal del Parque Nacional es la línea verde. En el centro de la poligonal la latitud es 23.5° N.

No conocemos trabajos publicados sobre las corrientes de la plataforma continental de Cabo Pulmo. Sin embargo, hay muchos estudios de la circulación en el mar profundo adyacente. Desde que se publicó el trabajo pionero de Gunar I. Roden (1972) sabemos de la existencia de chorros de corriente cercanos a la costa. Este autor describe estos chorros como ‘... corrientes costeras con un núcleo de alta velocidad, de 30 km de anchura, velocidades superiores a los 30 cm s⁻¹ y que alcanzan desde la superficie hasta los 700 m de profundidad...’. El trabajo de Collins et al. (1997) es el primero en reportar la presencia de núcleos de alta salinidad en la costa de Cabo Pulmo. Señala como causa posible la presencia de las corrientes de chorro. Estos chorros parecen ser capaces de acarrear aguas desde el interior del

Golfo de California, sobre el parque y hacia el sur, hasta el Océano Pacífico adyacente. En la tesis de licenciatura de Alvarado-Graef (1998) se reportan observaciones a lo largo de secciones hidrográficas perpendiculares a la costa. En muchas de éstas es común encontrar chorros costeros, tanto sobre el talud como sobre la plataforma continental de Cabo Pulmo. Ya en el presente siglo Mascarenhas et al. (2004) reportan secciones de la entrada al Golfo de California donde también hay corrientes de chorro frente a Cabo Pulmo, que se dirigen tanto hacia el norte como hacia el sur. Estos autores describen en detalle las estructuras frontales que generan los chorros y muestran la existencia de cortes horizontales de velocidad muy significativos.

En este trabajo se reportan las observaciones de la circulación realizadas entre octubre de 2010 y febrero de 2012. Estas incluyen mediciones de corrientes realizadas en puntos fijos (observaciones Eulerianas) mediante equipos acústicos autónomos instalados en el fondo marino. También incluimos series de tiempo puntuales de temperatura, nivel del mar y de variables meteorológicas, como apoyo para la discusión de la circulación.

En varias ocasiones durante el trabajo de campo realizamos observaciones de corrientes con boyas a la deriva (observaciones Lagrangeanas). Estas se hicieron en series cortas, de unas cuantas horas a la vez, y son de más utilidad para estimar dispersión y difusividad sobre el arrecife. Presentaremos estos resultados junto con las observaciones hidrográficas en otro documento. El presente trabajo estará enfocado a discutir la información que generamos sobre la circulación costera.

Separamos la presentación en tres secciones. La primera es la descripción de la metodología; la segunda es la discusión de las observaciones y la tercera es el sumario de las conclusiones y recomendaciones.

METODOLOGÍA

Instalamos equipos perfiladores de corrientes en las posiciones que se indican en la figura 2 y en la Tabla 1. Durante 2010 instalamos un ADP (siglas en inglés de Perfilador Acústico Doppler) marca Sontek que emite a una frecuencia de 500 KHz. Este instrumento lo configuramos para medir las corrientes de 20 m de profundidad hacia la superficie, en capas de dos metros de grosor. También instalamos un par de ADCPs (siglas en inglés para Perfilador Acústico Doppler de Corrientes) marca TRDI, que emiten a 1200 KHz (figura 2). Estos los configuramos para medir los perfiles de la corriente cada 10 minutos, en los 20 m superficiales, también en capas de dos metros de grosor. El ADP se instaló al norte del Parque Nacional, aproximadamente a 2.5 millas náuticas de la costa de Las Barracas; el ADCP 1 se ancló en el centro, a poco más de 1.5 millas mar afuera del poblado y el ADCP 2 a media milla de la costa, en el sur del Parque Nacional cerca del cerro de Los Frailes. A lo largo de la costa la distancia entre perfiladores es de 2.5 millas náuticas, aproximadamente (figura 2).

También medimos las corrientes con flotadores. Este método complementa las observaciones de los perfiladores acústicos. Tiene la ventaja de que proporciona mediciones a lo largo del área

de interés y puede servir para identificar zonas de remanso, o de intensificación, del flujo. Los flotadores que construimos para este proyecto constan de una cruceta de tela plástica que sirve como elemento de arrastre, y un mástil central que soporta las boyas de flotación y contiene un equipo de posicionamiento global (GPS). El GPS graba el tiempo y las posiciones del flotador durante su estancia en el agua. Con las posiciones calculamos las velocidades a lo largo del trayecto. Este método requiere de vigilancia constante para garantizar la recuperación de los flotadores. A esto le llamamos 'pastoreo' de flotadores. Es un método muy efectivo pero tiene dos limitaciones importantes: 1) sólo podemos medir durante las horas de luz y 2) sólo podemos trabajar cuando las condiciones del mar son buenas para navegar con embarcaciones pequeñas. Actualmente estamos desarrollando una metodología mediante seguimiento satelital que aplicaremos en los próximos meses para obtener información más completa de los flotadores. Por estos motivos aquí las observaciones Lagrangeanas se reportarán por separado.

Instalamos una estación meteorológica Davis para registrar dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica. Instalamos también un par de sensores de presión marca ONSET (HOBO U20). Uno se instaló en el anclaje del ADP, a 20 m de profundidad, y el otro en tierra para medir presión atmosférica. La presión atmosférica se resta de la presión registrada por el instrumento sumergido para conocer el nivel del mar. Este instrumento también mide la temperatura.

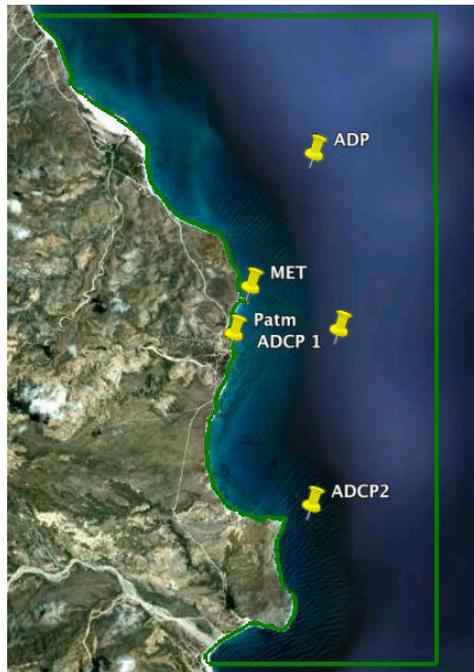


Figura 2. Posición de los instrumentos sobre una foto obtenida de Google Earth. La línea verde delimita el Parque Nacional. Se señala la posición de los tres perfiladores de corrientes: al Norte (ADP), al centro un perfilador (ADCP 1) con un sensor de presión y al sur el tercer perfilador (ADCP 2). La estación meteorológica se instaló en el Cabo Pulmo (MET) y un sensor de presión atmosférica en una casa de la localidad (Patm).

Tabla 1. Posiciones de los anclajes con perfiladores acústicos. Aunque estas corresponden al último periodo de observación los anclajes siempre se instalaron alrededor de estos puntos. En el sitio del ADP se incluyó también un sensor de presión marca ONSET para registrar variaciones del nivel del mar.

Instrumento	Latitud	Longitud	Prof. (m)	Referencia
ADP SONTEK 500 KHZ	23°28.253'N	109°24.642' W	24.4	Frente a Las Barracas
ADCP 1 RDI 1200 KHz No 3664	23°26.302' N	109°24.466' W	16.5	A un lado del Cantil
ADCP 2 RDI 1200 KHz No 5457	23°24.109' N	109°24.675' W	20.8	Frente a Las Casitas

Tabla 2. Datos de los diferentes instrumentos hasta febrero de 2012.

INSTRUMENTO o tipo de medición	2010			2011										2012			
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
ADP																	
ADCP1																	
ADCP2																	
FLO																	
NM																	
TEM																	
MET																	

La información que hemos generado hasta febrero de 2012 se resume en la Tabla 2. Aquí sólo presentaremos datos de dos perfiladores acústicos: el ADP para el período de octubre a diciembre de 2010 y el ADCP 1 para el período de agosto 2011 a diciembre de 2012. El ADP se configuró para medir las corrientes cada 30 minutos, en celdas de 2 m. Los ADCPs se configuraron para medir las corrientes cada 10 minutos, en celdas de 1 m de grosor.

Las observaciones de los ADCP 1 y 2 son parecidas y por esto sólo se presentan los datos del equipo del sur (ADCP 2). Se instalaron ambos equipos para contar con redundancia, en caso de que alguno de los perfiladores presentara una falla. No tenemos datos en el periodo de enero a septiembre de 2011. A pesar de que el ADP estuvo instalado en esas fechas este equipo falló porque explotaron las baterías dentro de la caja de presión y en consecuencia el instrumento dejó de grabar. Descontando las fallas instrumentales y otras dificultades, actualmente contamos con datos de corrientes en tres estaciones del año: otoño e inicios del invierno de 2010 (datos del ADP), y verano, otoño y parte de invierno de 2011 (datos del ADCP 1 y 2).

Los datos de los perfiladores acústicos se consideran del tipo Euleriano porque representan observaciones del flujo en un punto fijo. En teoría es posible estimar el comportamiento corriente arriba de las parcelas de fluido que llegan al punto de observación. Esto es equivalente a estimar el comportamiento Lagrangeano de las corrientes a partir de mediciones Eulerianas. Hacerlo con un solo punto de observación implica suponer que las corrientes Eulerianas

representan el comportamiento de todo el campo de velocidad. Esta es una suposición que no necesariamente se cumple. Los desplazamientos que presentamos en este trabajo se calculan integrando cada una de las componentes de la velocidad y se grafican en un plano horizontal. Estos desplazamientos se usan exclusivamente para conocer las tendencias del flujo en el punto de observación. Independientemente de su validez para todo el campo de velocidad, los desplazamientos que presentamos aquí son una medida de la tendencia acumulativa del flujo en ese punto de observación. Estos gráficos nos permiten visualizar los cambios en la dirección neta del desplazamiento de una parcela que pasa por el punto de observación, afectada por el forzamiento periódico de la marea y por influencias tales como el viento y las corrientes de origen remoto.

Las observaciones Lagrangeanas (FLO, por flotadores, en la Tabla 2) se hicieron en mayo, junio, agosto, septiembre y octubre de 2011. Estas son series cortas de unas cuantas horas de duración. Servirán para describir otras características del flujo relacionadas con la dispersión de partículas, pero no se incluyen en este trabajo.

Discusión de los resultados

Variables meteorológicas

Iniciaremos con la discusión de la información meteorológica. Los vientos constituyen uno de los forzamientos más importantes de la zona costera y generan corrientes locales importantes. También pueden modificar las características de las corrientes remotas que arriban a la zona de interés. La estación meteorológica generó datos entre junio de 2011 y enero de 2012 y siguió funcionando hasta febrero.

La figura 3 contiene rosas de los vientos mensuales. La dirección indica de donde viene el viento, según la convención meteorológica. Entre junio y septiembre la dirección dominante del viento es del sureste. Las intensidades más frecuentes son entre 4 y 10 m/s, y en pocas ocasiones alcanzan 12 m/s. A partir de octubre se observa un cambio de la dirección dominante del viento y a partir de noviembre dominan los vientos del noroeste. En octubre las intensidades son bajas, siempre menores a 10 m/s, pero de noviembre en adelante hay muchos días en que se alcanzan los 10 m/s y es más común que se registren 12 m/s. En esta gráfica destaca la clara dominancia de los patrones estacionales de gran escala sobre las brisas locales.

En la figura 4 se observan otras variables meteorológicas para los meses de junio a agosto (JJA). Las temperaturas son relativamente frescas en junio con muchos días menores a 25°C. En julio y agosto los valores se mantienen alrededor o por encima de los 30°C. Las humedades relativas promedian 80%, pero sus variaciones diurnas pueden disminuir a 60%. Algunos eventos de corta duración en los que la humedad disminuye a 40% están probablemente asociados al arribo de vientos de tierra. La presión atmosférica se mantiene alta durante todo el período. Sólo a principios de julio se registra una depresión de aproximadamente 10 milibares (de 1010 a 1000), asociada al paso de una depresión tropical afuera del Golfo de California.

La figura 5 muestra las temperaturas, humedades y presión para Septiembre, Octubre y Noviembre (SON). Las temperaturas se mantienen alrededor de 30°C en septiembre y parte de octubre. Es

sólo hacia finales de octubre que los valores muestran una tendencia clara a bajar. A fines de noviembre las temperaturas medias diarias se encuentran alrededor de los 24°C. Las humedades relativas siguen elevadas, alrededor del 80%, con variaciones diurnas que pueden disminuir hasta 60%. Se siguen registrando eventos en los que la humedad puede bajar a 40%, probablemente debido a vientos de tierra. La presión atmosférica se mantiene alta durante todo el período y exhibe tendencia a aumentar. En septiembre el promedio se encuentra alrededor de 1010 mb y a fines de noviembre alcanza un promedio diario de 1015 mb.

La figura 6 contiene las temperaturas, humedades y presiones de diciembre, a enero y febrero de 2012 (DEF). Las temperaturas descienden a un valor promedio de 20°C y sólo pocos días alcanzan valores de 25°C. La variación de la humedad relativa es mayor que en otros meses. Esto se debe a que los eventos de viento típicos de esta época no siempre acarrearán masas de aire húmedo. En ocasiones acarrearán condiciones secas. Se registraron eventos de más de 80% y decrementos bruscos a valores de 20% de humedad. La presión atmosférica se mantiene alta durante todo el período, con períodos largos que oscilan alrededor de 1015 mb y sólo eventos de corta duración en los que disminuye a 1010 mb.

Corrientes en la zona costera

A continuación presentamos los resultados de las observaciones de corrientes en los diferentes períodos de observación. Primero mostraremos los datos del perfilador instalado en la parte norte del Parque (ADP, Fig. 2), entre octubre y diciembre de 2010. Posteriormente se

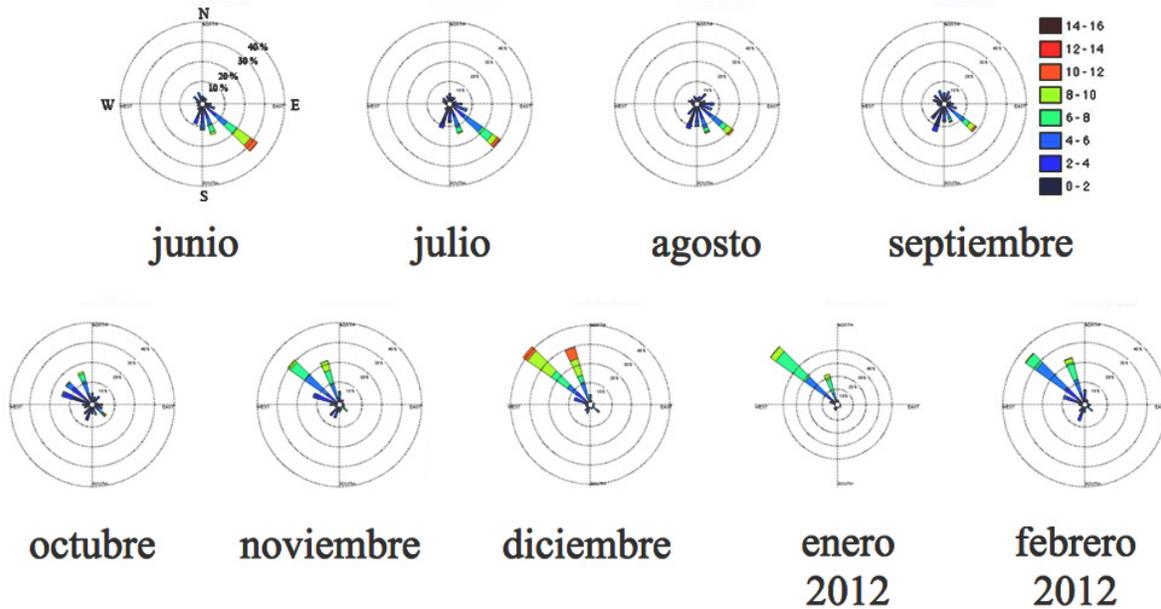


Figura 3. Rosas de los vientos de junio de 2011 a febrero de 2012, los colores (según la escala de septiembre) indican la intensidad del viento en metros por segundo y los círculos concéntricos el porcentaje de frecuencia en cada dirección (como en junio de 2011). La dirección es ‘de donde viene’ el viento según la convención meteorológica. El mes de enero de 2012 presenta una alta frecuencia de vientos del noroeste (>50 %) y por eso los círculos concéntricos son más chicos.

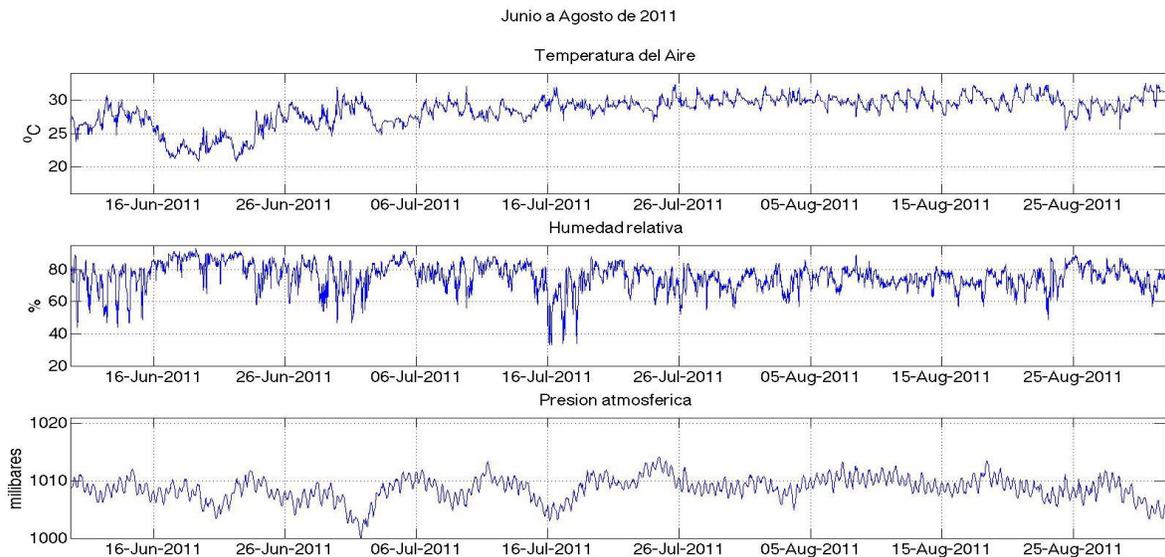


Figura 4. Variables meteorológicas de junio, julio y agosto (JJA) de 2011: temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica.

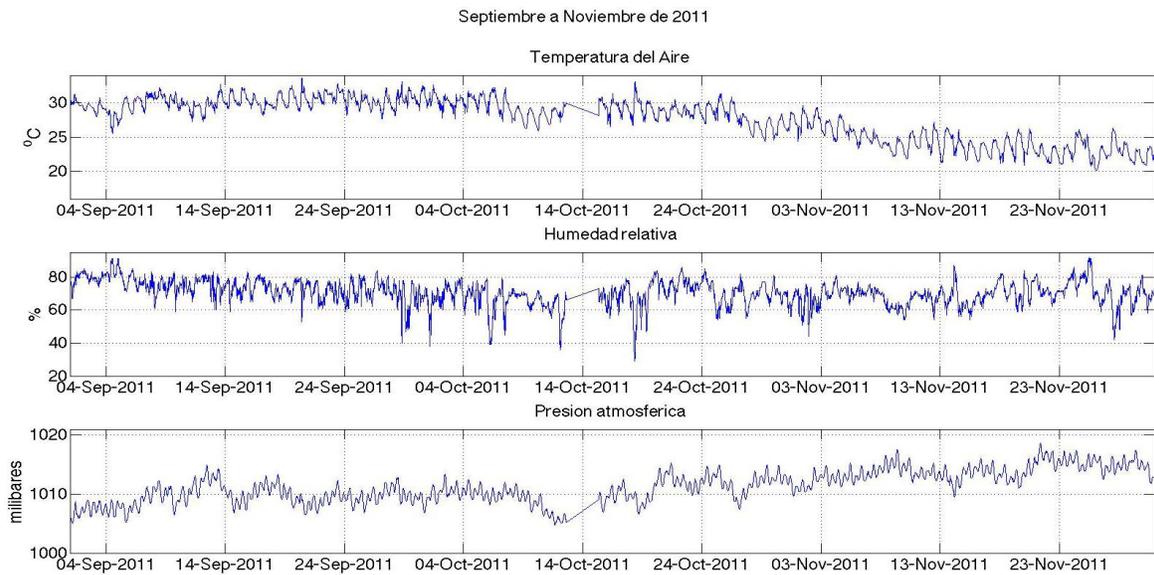


Figura 5. Variables meteorológicas durante septiembre, octubre y noviembre (SON) de 2011. Arriba: temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica.

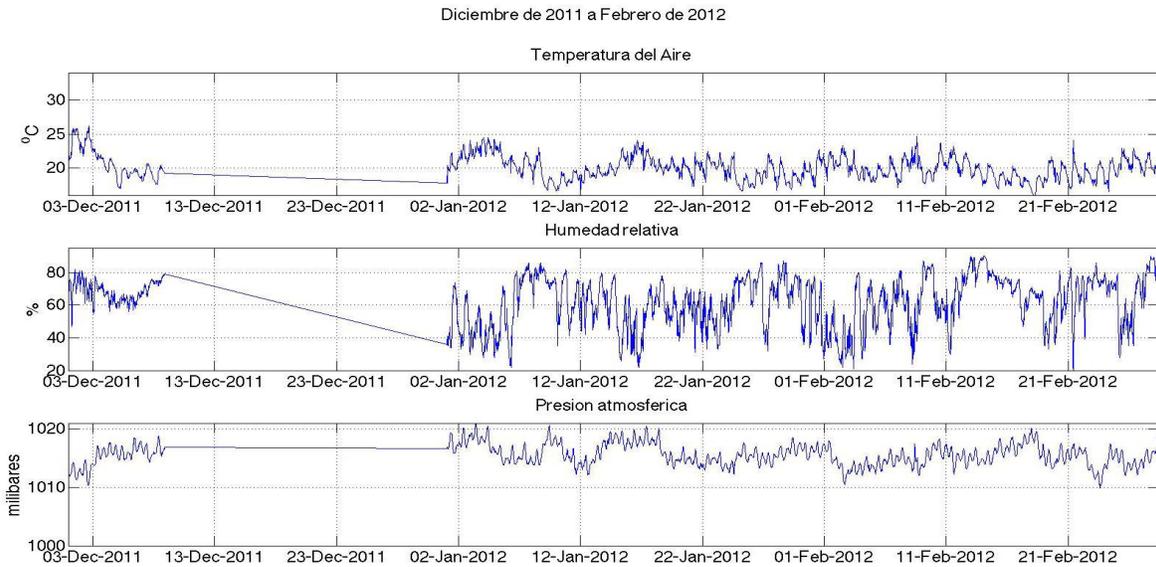


Figura 6. Variables meteorológicas durante diciembre, enero y febrero (DEF) de 2011-2012. Temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica

describen las observaciones del perfilador del sur (ADCP 2, Fig. 2), entre septiembre de 2011 y febrero de 2012. Hay muchos aspectos de las corrientes que pueden ser de interés pero enfocaremos el análisis a la variabilidad del flujo a lo largo de la costa.

Primer período de observación de corrientes (29 de septiembre al 31 de diciembre de 2010).

Estos datos provienen del perfilador ADP en el norte del Parque (Fig. 2). Durante los tres meses se observan comportamientos cambiantes que describiremos a continuación. En general esperamos observar corrientes debidas al viento y a la marea. El esfuerzo del viento actúa sobre la superficie y genera corrientes que disminuyen hacia el interior del fluido. El comportamiento de la corriente de marea es distinto. Desde la solución a las ecuaciones de marea de Laplace sabemos que la corriente de marea es barotrópica (ver, por ejemplo Gill, 1982). Y la razón de esto es que la atracción gravitacional actúa sobre todo el fluido. Por esto es que las corrientes de marea generan corrientes de la misma magnitud en toda la columna, exceptuando sólo la capa límite superficial (donde el viento actúa) y una delgada capa cerca del fondo donde la fricción domina sobre otros efectos. Otros forzamientos como la advección debida al oleaje (deriva de Stokes) también ocurren pero las observaciones que estamos discutiendo no son apropiadas para describirla. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo es baja (10 minutos o más) y también a la orientación de los perfiladores acústicos (en el fondo, viendo hacia arriba) que impide la observación de fenómenos muy cerca de la superficie.

Para este período de observación no

contamos con mediciones meteorológicas. Nos apoyaremos en el patrón estacional descrito en la sección anterior con datos de 2011 y 2012. Allí destaca la ocurrencia de vientos del sureste en el verano y los vientos del noroeste en el otoño e invierno, típicos de la variación estacional del Golfo de California. Tampoco tenemos mediciones de nivel del mar. Por esto es que usamos predicciones de marea para Cabo San Lucas, disponibles gracias al grupo de mareografía del CICESE.

Estos tres meses de datos tienen en común que las velocidades más altas se encuentran siempre en el registro más cercano a la superficie y disminuyen hacia el fondo. Sin embargo el principio y el final del registro muestran comportamientos contrastantes que describiremos a continuación.

La figura 7 corresponde a las corrientes del mes de octubre de 2010. En azul se muestra el registro superficial (3 m), en negro a media agua (11 m) y en verde cerca del fondo (a 19 m de profundidad). Los primeros 10 días observamos un flujo intenso hacia el norte que se registra en toda la columna de agua. La magnitud de las velocidades disminuye desde máximos de 0.6 m/s en superficie hasta valores de 0.3 m/s cerca del fondo. El resto del mes las corrientes dominantes son lentas y muestran una clara periodicidad diurna. En esta parte del registro se observan dos situaciones. Cuando las velocidades son muy bajas, por ejemplo alrededor del 20 de octubre, su magnitud es de unos 0.25 m/s en toda la columna de agua. En otros momentos se observa intensificación superficial moderada. Por ejemplo, alrededor del 27 de octubre un perfil vertical muestra valores máximos superficiales de 0.4 m/s, 0.3 m/s a media agua y 0.25 m/s cerca del fondo.

La figura 8 muestra dos series de tiempo adicionales. En el panel de arriba comparamos la magnitud de la corriente a media profundidad con la predicción de la marea para Cabo San Lucas. La intensificación del flujo hacia el norte que ocurre los primeros 10 días de octubre coincide con una de las mareas vivas del mes. Sin embargo, en el siguiente período de mareas vivas las corrientes son muy débiles. El panel inferior de esta figura muestra el registro de temperatura del perfilador acústico (a 20 m de profundidad). Durante el evento de corrientes intensas hacia el norte las temperaturas presentan variaciones de pocas horas donde la temperatura cambia hasta 6°C (entre 23° y 29°C). El registro de temperatura deja de mostrar esta variabilidad el resto del mes. Creemos que ello se debe a un evento de viento que modificó todos los registros a principios de octubre, mientras que el resto del mes la variabilidad que registramos se debe a la dominancia de las corrientes de la marea.

Las rosas de corriente sirven (figura 9) para mostrar la estadística de direcciones y velocidades de la corriente. También indican la dirección persistente del flujo. En la superficie (panel izquierdo) se observan dos direcciones dominantes. La corriente hacia el norte alcanza valores más altos y aproximadamente 30% de las observaciones siguen esta dirección. Un porcentaje menor, cercano al 15% se dirige hacia el sureste. El 55% restante no presenta preferencia direccional clara pero son las corrientes más débiles. A media agua (panel central) este patrón se repite aunque con velocidades menores, y se incrementa un poco la proporción del flujo hacia el SE. Cerca del fondo (panel de la derecha) aumenta la variabilidad al mismo tiempo que las velocidades disminuyen.

El desplazamiento neto que resultaría de impulsar una parcela de agua con estas corrientes se describe en las gráficas de la figura 10. Esta es una medida de la persistencia del desplazamiento, en un punto fijo, debido a las corrientes medidas durante el mes. No debe confundirse con el desplazamiento Lagrangeano. En todos los casos, superficie (panel izquierdo), media agua (panel central) y fondo (panel izquierdo) se dirige hacia el norte. De manera consistente con las observaciones de corrientes, la magnitud del desplazamiento disminuye con la profundidad. Cerca de la superficie alcanza más de 250 km hacia el norte de su posición inicial. Bajo la superficie es de más de 150 km hacia el norte del punto de inicio. Esto se debe principalmente al evento de corriente hacia el norte que se describió con anterioridad.

Las corrientes de diciembre (Fig. 11) muestran un comportamiento muy diferente al de octubre (Fig. 7). Se midió un flujo intenso hacia el sur durante la primera quincena del mes. Este flujo se observa en toda la columna de agua y, aunque las velocidades disminuyen hacia el fondo lo hacen de manera muy gradual. En la superficie, los valores máximos alcanzan 0.5 m/s hacia el sur, mientras que a media agua disminuyen a 0.45 m/s y cerca del fondo a 0.4 m/s. Esto puede ser causado por un evento de viento o por un remolino de mesoescala que se acerca a la costa, o por ambos eventos que suceden al mismo tiempo. Dado que no contamos con registros de viento nos resulta imposible discernir la causa. El resto del mes las corrientes regresan a las magnitudes atribuibles a la marea. Presentan el vaivén diario de la dirección del flujo y las velocidades son débiles (0.2-0.3 m/s) y muy parecidas en magnitud en toda la columna de agua

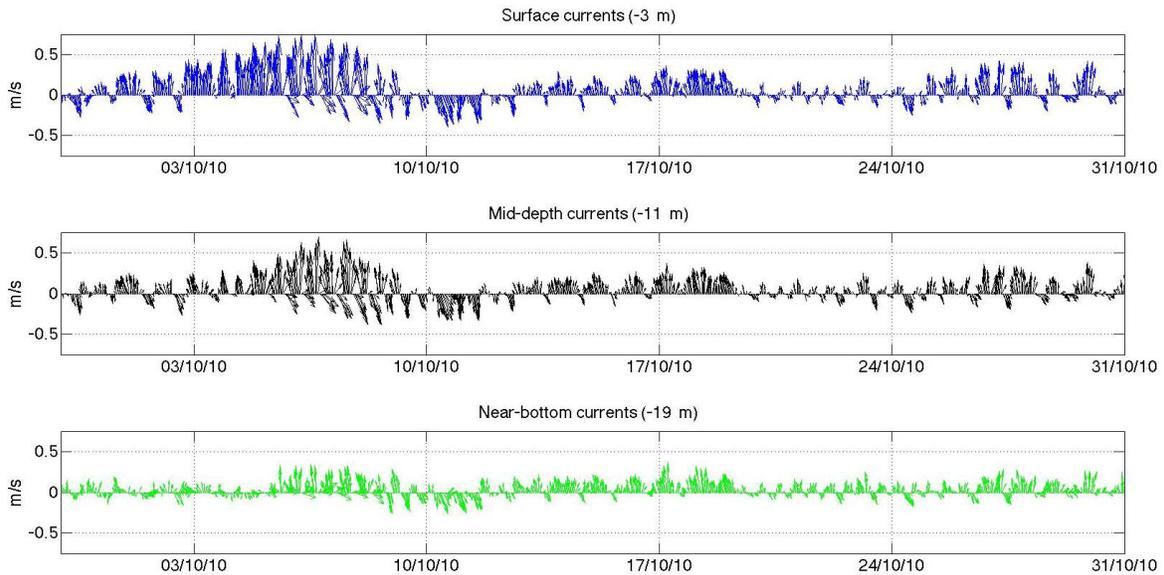


Figura 7. Diagramas de astilla de las corrientes de octubre 2010 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

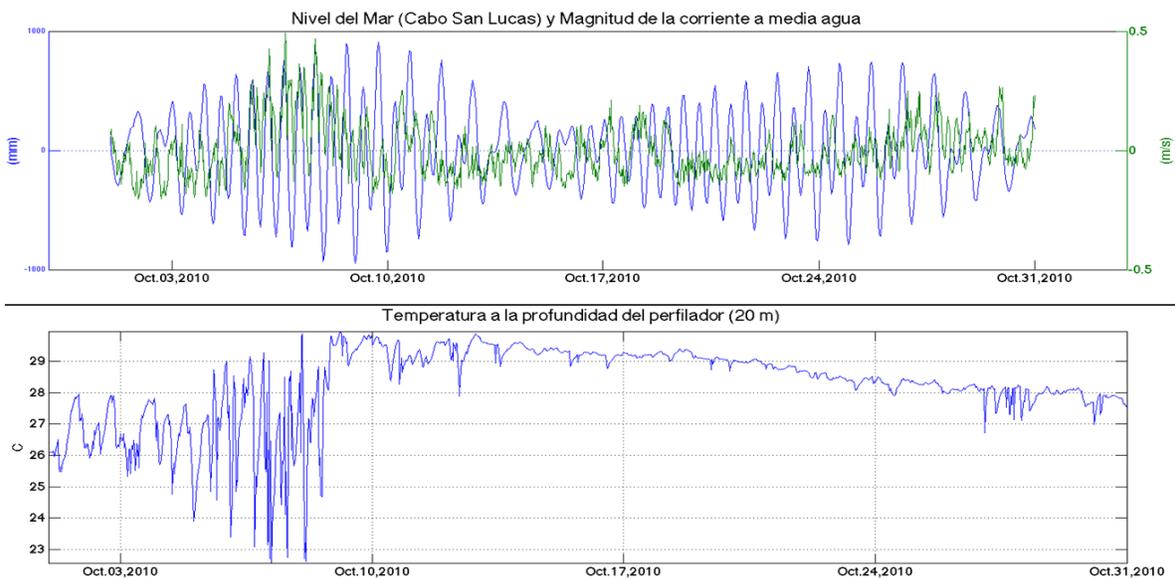


Figura 8. Arriba: comparación entre el nivel del mar (Cabo San Lucas, sin tendencia) y la magnitud de la corriente a media agua (11 m). Abajo: temperatura a la profundidad del ADP (20 m).

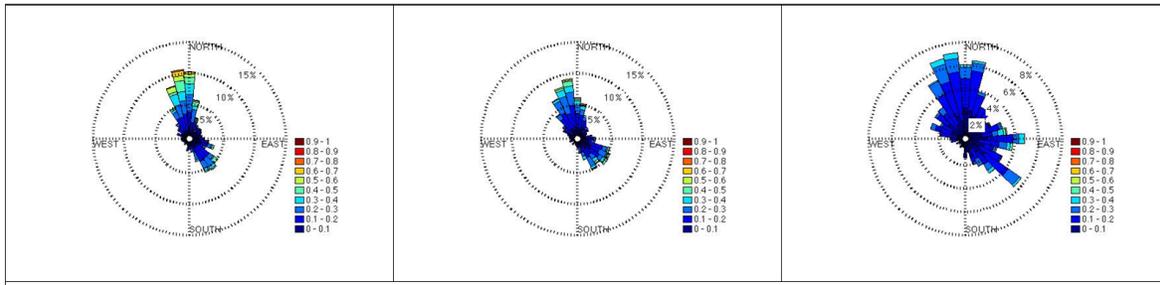


Figura 9. Rosas de corriente de octubre 2010. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua y derecha es el fondo.

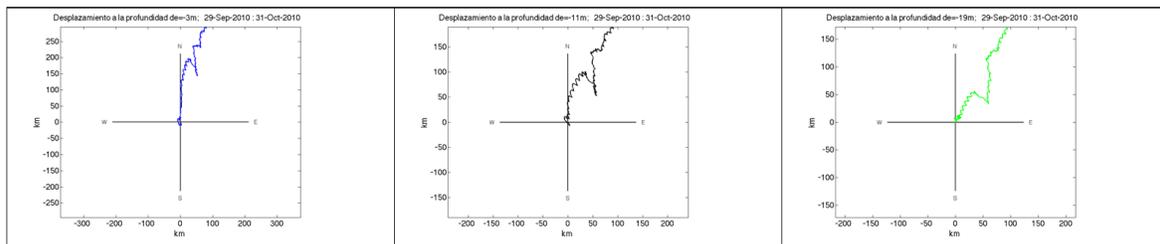


Figura 10. Desplazamiento de partículas en kilómetros y a las tres profundidades (octubre de 2010): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

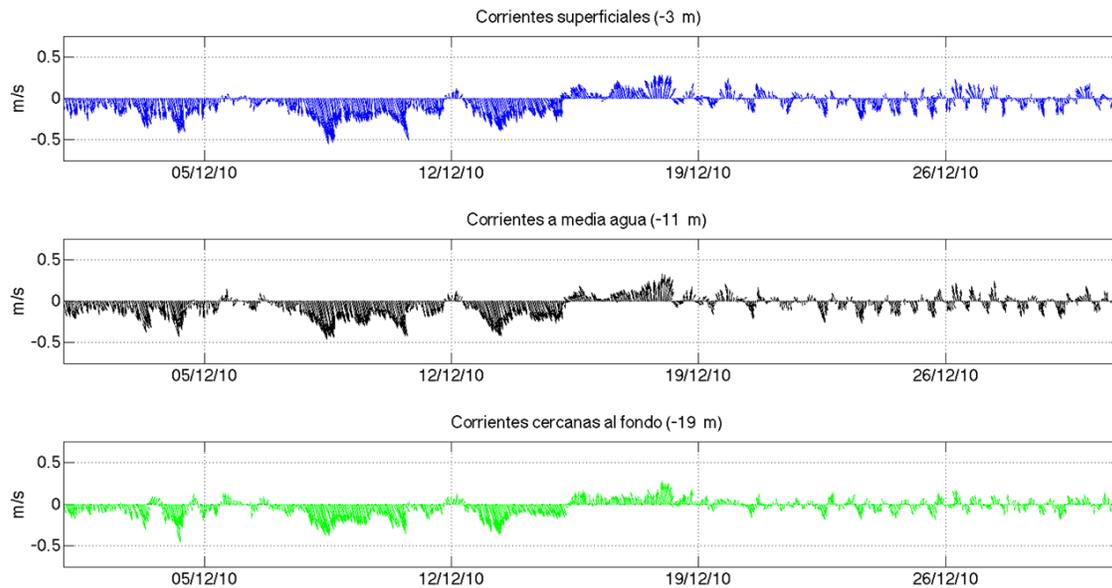


Figura 11. Diagramas de astilla de las corrientes de diciembre 2010 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

La dirección de la corriente persistente de diciembre (Fig. 12) es muy diferente a la anterior. Entre 40 y 45% de las observaciones hechas en toda la columna de agua se dirigen ahora hacia el sureste. Las velocidades máximas en la superficie alcanzan 0.6 m/s pero cerca del fondo se siguen observando velocidades de hasta 0.5 m/s. Es claro que en esta representación de las observaciones domina el evento de la primera quincena de diciembre.

En consecuencia, el desplazamiento neto

para diciembre de 2010, como se muestra en la figura 13, se dirige hacia el sur en los tres niveles. Cerca de la superficie (panel izquierdo) el desplazamiento alcanza los 250 km en el mes. A media agua (panel central) alcanza 200 km y cerca del fondo (panel derecho) llega a 150 km. Estos son valores significativos que resultan de los patrones de corriente más persistentes en la figura 11. La corriente de marea que se registra al final de diciembre es capaz de producir sólo pequeños desplazamientos netos.

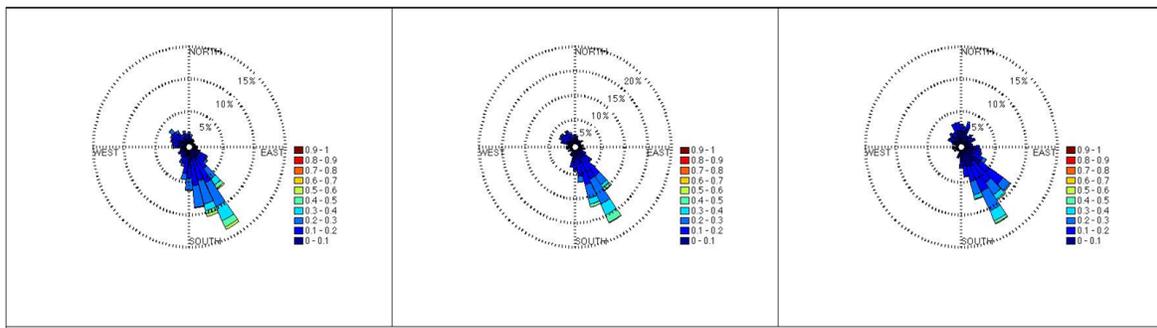


Figura 12. Rosas de corrientes de diciembre 2010. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua y derecha es el fondo.

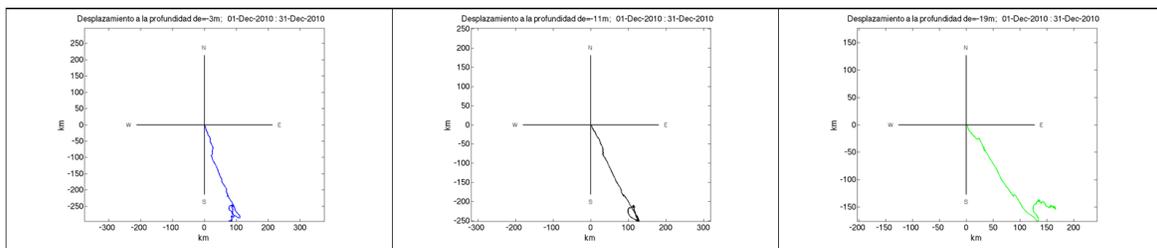


Figura 13. Desplazamiento de partículas a las tres profundidades (diciembre de 2010): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

Segundo período de observación de corrientes (14 de septiembre de 2011 al 4 de enero de 2012).

Estos datos provienen del perfilador ADCP 2, instalado en la parte sur del parque (Fig. 2). Con estos datos describiremos las observaciones en fechas comparables a las de 2010 para también entender un poco sobre la variabilidad natural de las corrientes en estos dos años consecutivos.

En la primera mitad de octubre de 2011 (Fig. 14) no se presenta un flujo dominante. Se observan corrientes periódicas en toda la columna de agua, más intensas en la superficie. La velocidad máxima superficial alcanza 0.3 m/s y bajo la superficie es < 0.2 m/s. Los vientos de la figura 3 muestran brisas débiles y un evento débil de viento del noroeste, quizás intensificadas por brisas en la superficie pero exhiben una dirección dominante. Alrededor del 12 de octubre hay una interrupción en las observaciones y después se observa cómo se intensifican las corrientes en toda la columna de agua. Este comportamiento de las corrientes en la segunda quincena de octubre es distinto a lo observado en 2010. En la superficie se observan las corrientes más intensas particularmente del 21 al 22 de octubre de 2011 y de nuevo después del 25 de octubre. Bajo la superficie se observa un flujo intenso en toda la columna de agua, con variaciones de período diurno. Sólo durante el 21 y 22 de octubre el flujo se dirige hacia el sur en toda la columna de agua, durante al primer evento de viento del noroeste. En esas fechas la estación meteorológica registró velocidades del viento de casi 12 m/s, con dirección proveniente del noroeste. Hacia finales del mes hubo otro evento de viento del noroeste pero de magnitud menor, con vientos máximos de 8 m/s.

En el panel superior de la figura 15 comparamos la magnitud de la corriente a media agua (11 m) con el nivel del mar del sensor de presión que instalamos en Cabo Pulmo. Aquí se observan más claramente los dos períodos del mes de octubre que mencionamos antes. Todo el mes las corrientes exhiben una periodicidad similar a la de la marea. La diferencia es que en la primera quincena los flujos son muy débiles (menores a 0.2 m/s) y el resto del mes las velocidades se intensifican hasta 0.3 m/s. El panel inferior de la figura 15 muestra el registro de temperatura del mismo sensor de presión, a 20 m de profundidad. Durante todo el mes se registraron eventos de enfriamiento de corto período. Del 1 al 10 de octubre las temperaturas descendieron hasta 4 grados, desde 31° hasta 27°C en pocas horas. Después de un período de poca actividad, a partir del 16 de octubre se vuelven a registrar eventos de enfriamiento cerca del fondo. Aunque las temperaturas máximas disminuyen gradualmente, algunos eventos vuelven a enfriar el agua más de 4 grados. Los eventos que ocurren después del 20 de octubre corresponden a eventos de vientos del noroeste. Para el resto de los casos no tenemos una explicación clara porque el viento que registró la estación meteorológica fue débil todo el resto del mes.

En la figura 16 se muestra la Rosa de Corrientes para describir la persistencia del flujo. En la superficie (panel de la izquierda) el flujo exhibe tres direcciones distintas de circulación. A media profundidad (panel del centro) predomina el flujo a lo largo de la costa (40% hacia el norte o sur). Cerca del fondo (panel derecho) también se observa la predominancia del flujo a lo largo de la costa sobre las otras direcciones, aunque el rango de direcciones observadas es

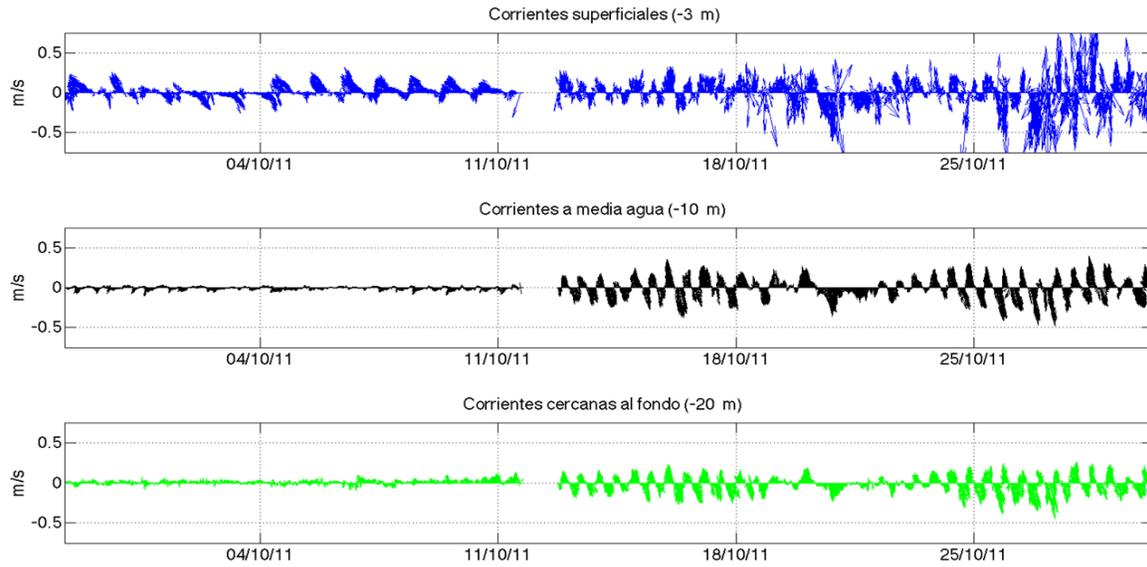


Figura 14. Diagramas de astilla de las corrientes de octubre 2011 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

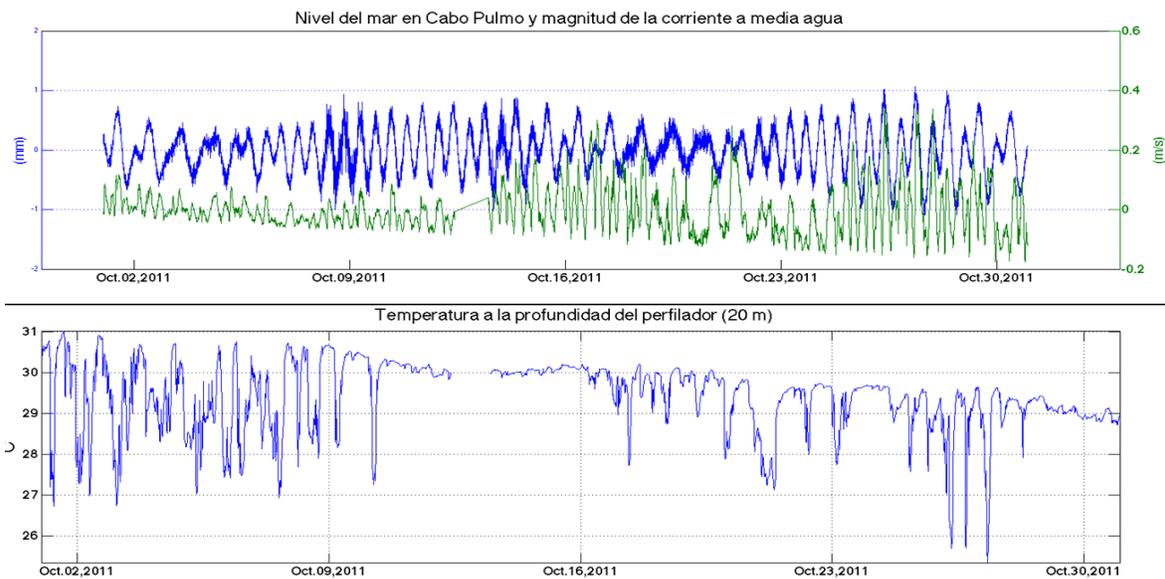


Figura 15. Arriba: comparación entre el nivel del mar (sensor de presión en Cabo Pulmo, sin tendencia) y la magnitud de la corriente a media agua (11 m). Abajo: temperatura a la profundidad del ADCP (20 m).

más amplio que a media agua. Esto tiene una consecuencia en los desplazamientos netos en el mes, como se observa a continuación.

A diferencia de octubre de 2010, cuando todos los desplazamientos fueron hacia el norte (ver la figura 13), los desplazamientos ahora cambiaron de dirección durante el mes (Fig. 17). En la superficie (panel de la izquierda) se dirigen hacia el norte al inicio del mes, pero después su sentido cambia y la parcela acaba al sur de su posición inicial. La magnitud de los desplazamientos superficiales es <100 km, comparada con 150 km en 2010. Bajo la superficie (panel central y de la derecha) los desplazamientos a media profundidad son hacia el sur, y cerca del fondo, primero hacia el norte y después hacia el sur. A media profundidad se observan períodos de excursiones cortas, de ida y vuelta, que reducen el desplazamiento máximo a sólo unos 60 km. Cerca del fondo este desplazamiento máximo disminuye a menos de 20 km. Este es un comportamiento inesperado para una costa expuesta como la del Parque Nacional de Cabo Pulmo pero se debe a que este mes de octubre 2011 registramos corrientes débiles y también a que no ocurrieron eventos intensos de vientos del noroeste.

Los diagramas de astillas de la figura 18 corresponden a diciembre de 2011 y muestran corrientes intensificadas en la superficie y con dirección predominante hacia el sur en toda la columna de agua. Las corrientes superficiales alcanzan los valores más intensos del registro, superiores a 1.5 m/s. Es difícil discernir el efecto de las corrientes de marea en estas observaciones. Bajo la superficie la intensidad del flujo disminuye y es mucho más regular. A media agua se registraron

valores máximos de casi 0.5 m/s alrededor del 25 de diciembre. Cerca del fondo ese día las velocidades alcanzaron casi 0.4 m/s. Los vientos este mes fueron casi exclusivamente del noroeste (ver figura 3) y hubo muchas ocasiones en que se registraron intensidades de hasta 12 m/s. Esto nos lleva a suponer que las corrientes observadas se deben, en gran medida, al forzamiento del viento. No descartamos, sin embargo, la influencia de estructuras de mesoescala que pueden ocurrir en esta época del año en las cercanías de Cabo Pulmo.

La predominancia del flujo (Fig. 19) en todo el mes de diciembre es hacia el sur en toda la columna de agua. En la superficie (panel de la izquierda) un 35% del flujo se dirige al sur y allí se registran también las velocidades más altas. A media agua (panel central) la proporción que se dirige hacia el sur es superior al 45%, aunque las velocidades disminuyen a un promedio de 0.5 m/s. Cerca del fondo (panel de la derecha) el flujo dominante incluye más del 30% de las observaciones pero ahora vira un poco hacia el sureste, quizás por influencia de la topografía que rodea al sitio de observación. Todo lo anterior tiene una consecuencia dramática en los desplazamientos que se describen enseguida.

Como es de esperarse, los desplazamientos de la figura 20 son hacia el sur en las tres profundidades. La diferencia ahora es que la magnitud es muy superior a lo registrado en otras ocasiones. En la superficie (panel de la izquierda) el desplazamiento máximo supera los 300 km. A media profundidad (panel central) supera los 200 km y cerca del fondo (panel de la derecha) es de casi 150 km. Estos desplazamientos sólo nos dan una idea de la tendencia del flujo en el sitio de observación. No se deben

interpretar como desplazamientos reales. Sin embargo, es claro que la componente neta del desplazamiento en diciembre y, posiblemente todo el resto del invierno,

será hacia el sur debido a la influencia de los vientos del noroeste sobre toda esta región del Golfo de California

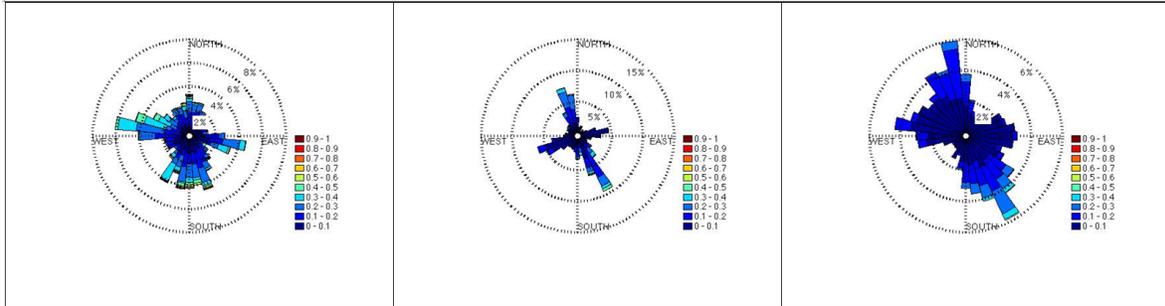


Figura 16. Rosas de corriente de octubre 2011. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua y derecha es el fondo.

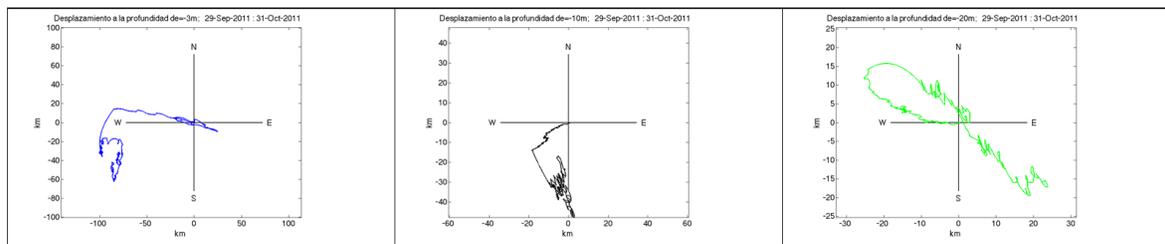


Figura 17. Desplazamiento de partículas a las tres profundidades (octubre de 2011): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde

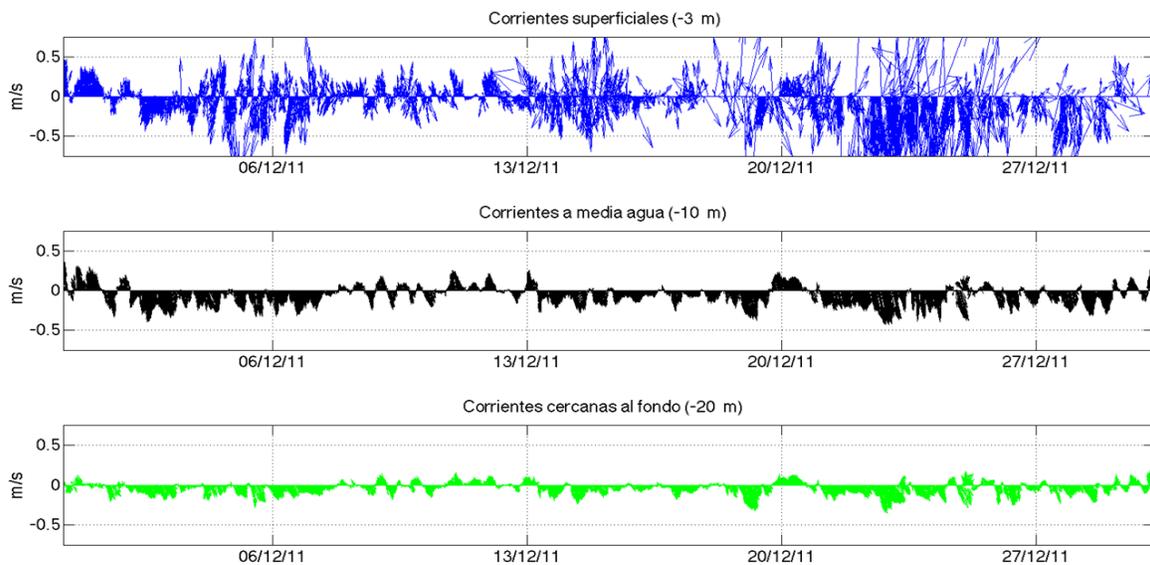


Figura 18. Diagramas de astilla de las corrientes de diciembre 2011 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

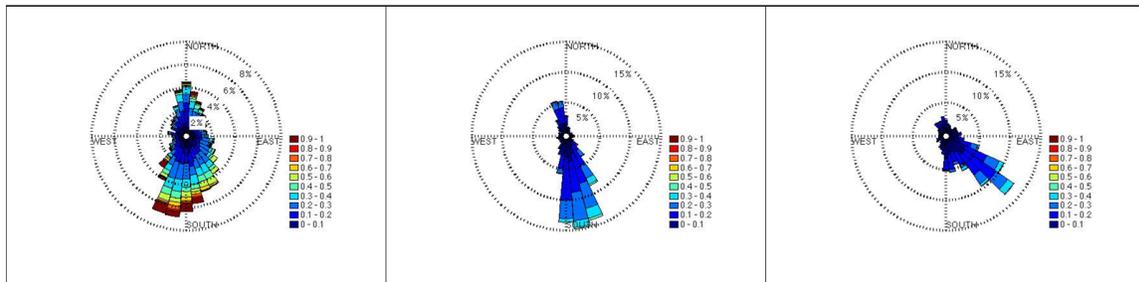


Figura 19. Rosas de corriente de diciembre 2011. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua, y derecha es el fondo.

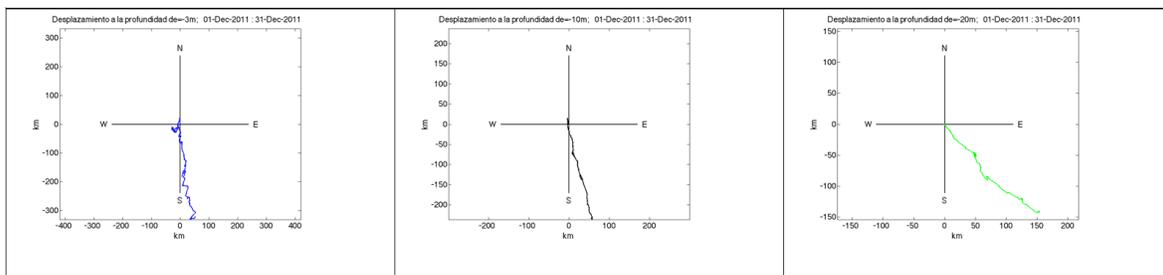


Figura 20. Desplazamiento de partículas a las tres profundidades (diciembre de 2011): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo discute las observaciones de corrientes obtenidas durante más de un año de trabajo de campo, en la zona costera de Parque Nacional de Cabo Pulmo. A pesar de que se perdieron las observaciones del invierno y primavera de 2011, tenemos suficientes datos para mostrar las condiciones contrastantes de verano, otoño e inicios del invierno.

Durante la época de verano, cuando el viento es débil, las corrientes de marea dominan la mayor parte de la circulación en la columna de agua y sólo los primeros metros superficiales muestran influencia del viento. En esta época la circulación costera se caracteriza por el vaivén del flujo a lo largo de la costa, modulado en

la superficie por las brisas o por eventos ocasionales de mayor intensidad. También se observa la influencia de los vientos del sureste que son el patrón dominante del verano en esta región del Golfo de California.

En contraste, el invierno muestra los efectos de los vientos intensos del noroeste. Estos eventos tienen duraciones de días y son capaces de modificar la circulación en toda la columna de agua. Dominan el flujo aún sobre la circulación de la marea. La circulación de principios del invierno que hemos registrado en estas observaciones documenta condiciones extremas de corrientes de hasta 2 m/s en la superficie y de 0.5 m/s cerca del fondo. En invierno es cuando el flujo costero hacia el sur, a lo largo de la costa, es más intenso y persistente.

La situación en otoño es, simplemente, intermedia entre verano e invierno. En otoño se encuentra la mayor variabilidad. El flujo costero cambia de dirección hacia el sur o hacia el norte, pero siempre tiene esta dirección predominante a lo largo de la costa.

A futuro proyectamos continuar analizando la información del resto del invierno y de la primavera. Esto nos permitirá entender el ciclo anual completo. También continuaremos con experimentos Lagrangeanos con boyas a la deriva (los datos no se muestran aquí) para entender mejor la circulación débil durante los meses de verano. Estos experimentos nos permitirán determinar la excursión de parcelas de agua debidas a la corriente de marea. Las aproximaciones que presentamos en este reporte (los diagramas de desplazamiento) proporcionan solamente una estimación de los desplazamientos en el sitio de observación. Es importante medir la circulación por métodos Lagrangeanos para determinar los desplazamientos reales, para determinar también los flujos residuales y sus consecuencias en el Parque Nacional de Cabo Pulmo, por ejemplo, su sensibilidad ante flujos de contaminantes que pudieran ser generados por poblaciones o desarrollos turísticos vecinos. La información de boyas a la deriva también servirá para entender los patrones de dispersión. Ello, a su vez, permitirá conectar estos resultados dinámicos con los estudios biológicos que se interesen en entender procesos de dispersión de larvas y huevos de los organismos arrecifales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la comunidad de Cabo Pulmo, especialmente a los buenos amigos de Cabo Pulmo Divers y a Amigos de Cabo Pulmo A.C.. Gracias a Miguel Ángel Cosío López, Hernando Torres Chávez y Eduardo González Rodríguez, técnicos de la Unidad La Paz del CICESE, sin su trabajo y experiencia en el campo este artículo no habría sido posible. Colaboraron también en este esfuerzo la Sociedad de Historia Natural Niparájá A.C, la International Community Foundation y el Leona M. and Harry B. Helmsley Charitable Trust. Agradecemos también la contribución de los estudiantes del verano científico del 2011 apoyados por los programas del Verano del Pacífico, Delfín y Academia Mexicana de Ciencias. Agradecemos el trabajo de predicción de mareas para Cabo San Lucas, realizado por Juan Ignacio (“Nacho”) González Navarro. Agradecemos la crítica constructiva de Rubén Castro y un revisor anónimo. Y muy especialmente a Luis Delgado Argote por su ardua labor como editor de la revista El presente trabajo fue apoyado por la División de Oceanología del CICESE y ATC es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI 12406).

REFERENCIAS

Alvarado-Graef, P., 1998. Estructura hidrográfica y circulación costera frente a Baja California Sur, en el Pacífico y en el Golfo. Tesis de Licenciatura de Oceanólogo. Facultad de Ciencias Marinas. UABC, Ensenada, Baja California, 75 p.

Castro, R., R. Durazo, A. Mascarenhas, C. Collins, and A. Trasviña, 2006. Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers* 53(1): 188–200.

Collins, C.A., N. Garfield, A.S. Mascarenhas Jr., M.G. Spearman, and T.A. Rago, 1997. Ocean currents across the entrance to the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 102(C9):20927–20936.

Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. International Geophysics Series, Vol. 30, Academic Press, 662 pp. ISBN 0122835220, 9780122835223.

Mascarenhas Jr., A.S., R. Castro, C.A. Collins, and R. Durazo, 2004. Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research* 109, C07008, 9 pp., doi:10.1029/2003JC002124.

Roden, G.I., 1972. Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revillagigedo Islands regions. *Journal of Physical Oceanography* 2: 177–18.

Manuscrito recibido: 4 de julio de 2012.

Recepción del manuscrito corregido: 12 de septiembre de 2012.

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2012.