

ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CANAL DE ACCESO DEL PUERTO DE LA UNIÓN CENTROAMERICANA



Caracterización de la Bahía de La Unión

El Golfo de Fonseca, ubicado en la costa del Pacífico Centroamericano y compartido por El Salvador, Honduras y Nicaragua, ocupa un área aproximada de 2 015 km² en su cuerpo de agua y está conformado por diferentes áreas; cuerpo central, las bahías de La Unión, Chismuyo y San Lorenzo, así como, canales entre islas y entre estas y la costa. Además, forman parte de este accidente geográfico un total de 13 islas las cuales en su conjunto suman un área de 547,7 km². (ECOH Corporation, 2009)

De forma general, se distinguen dos grandes unidades de circulación estuarina. La primera conformada por las bahías de La Unión, Chismuyo y el cinturón de islas y la segunda, por las bahías de San Lorenzo y Chorotega (ECOH Corporation, 2009).

Para el presente proyecto, la zona objeto de estudio se encuentra en la bahía de La Unión, ubicada hacia la región noroeste del golfo con un área aproximada de 144,1 km². En general, la costa está rodeada por regiones de canales de poca profundidad, manglares y áreas arenosas desprovistas de vegetación. Hacia el extremo norte de la bahía destaca la presencia del delta que se forma la desembocadura del Guascorán donde se encuentran amplias zonas de marismas con un fondo de fangos blandos o arenosos.

Según se define en el Coastal Engineering Manual (CEM, 1991), un estuario es un área de interacción entre el agua salada y el agua dulce. La ampliación más comúnmente aceptada de esta definición es la ofrecida por Cameron y Pritchard (1963) que lo definen como un cuerpo de agua semi - cerrado en la zona costera, con una conexión libre a mar abierto, donde se produce la mezcla del agua salada con el agua dulce aportada por desagües de tierra. Otros autores amplían la influencia del estuario a toda la zona costera donde se produce la interacción entre el agua dulce y la salada, incluso fuera de los límites del cuerpo inicial (Hopkinson y Hoffman, 1983).

En cuanto a su topografía, se sugieren tres grupos; estuarios de llanura costera, fiordos y estuarios de barra adosada.

Los estuarios en llanuras costeras o en valles de ríos anegados, fueron formados como consecuencia del derretimiento de los hielos durante la última glaciación, inundándose el valle de los ríos en las costas bajas. El flujo del río es normalmente pequeño comparado con el generado por la fluctuación de las mareas y la sedimentación no es capaz de sobrepasar la inundación. Como resultado, en el estuario se mantuvo la topografía del valle del río en profundidades relativamente someras (rara vez supera los 30 m de profundidad) y sobre el fondo se extienden llanuras de lodos con un sinuoso canal central a mayores profundidades.

Al profundizarse en las características morfológicas y sedimentológicas de la bahía de La Unión, es posible ubicarlo dentro de esta clasificación. En su batimetría todavía es posible identificar claramente el cauce principal del río que dio origen a esta llanura costera, el cual se extiende desde las inmediaciones de la isla Perico, siguiendo el borde de la costa salvadoreña hasta desembocar en el canal formado por la isla Zacatillo y punta Chiquirín. Además, hacia la zona centro oriental de la bahía se encuentran las llanuras de sedimentos areno arcillosos, en profundidades someras entre 5 m y 0,5 m.

En cuanto a la estructura de la salinidad, la clasificación propuesta define igualmente tres grupos; altamente estratificados, parcialmente mezclados y muy mezclados (CEM, 1991). Según los resultados obtenidos durante las mediciones oceanográficas en marzo y abril de 2017, no se observó una estratificación clara de las masas de aguas por su salinidad, por lo que se pudiera clasificar como muy mezclado. Se debe tomar en consideración que estas fueron realizadas en una época del año extremadamente seca, donde los aportes de agua dulce fueron muy limitados. Sin embargo, durante los trabajos de campo y las mediciones realizadas durante la época lluvia (septiembre – octubre de 2017) se pudo comprobar la mezcla del agua dulce, aportada por los ríos y quebradas, confirmando el funcionamiento de estuario de este cuerpo de agua.

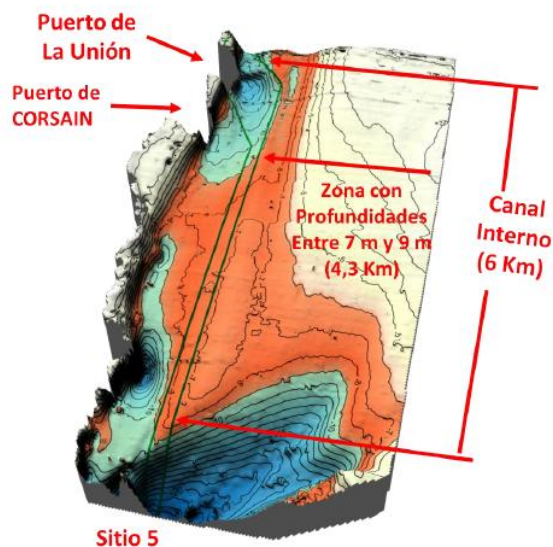
Un factor importante para realizar propuestas y diseños de soluciones ingenieriles, encaminadas al funcionamiento del puerto, es comprender el comportamiento estuarino de la bahía y la morfología del fondo, determinados por la acción de las corrientes generadas por los cambios de la marea y los gradientes de densidad como consecuencia de la estratificación de las masas de agua.

La bahía de la Unión se caracteriza por sus bajas profundidades. La isobata de 20 m se encuentra en las proximidades de la isla Meanguera, a la entrada del golfo, mientras que la de 10 m penetra en forma de lengua por el estrecho que forman la isla Zacatillo y Punta Chiquirín, evidentemente, por el efecto de las fuertes corrientes de marea que se generan en esta zona, siendo este el único punto donde se pueden encontrar profundidades entre 30 m y 40 m.

La isobata de 5 m se extiende paralela a la costa occidental de la bahía, formándose hacia el lado oeste de su posición un canal natural con profundidades entre 8 m y 7 m, el cual se va estrechando a medida que se acerca y sobrepasa la ciudad de La Unión, al este de la isla Perico, en las proximidades del delta que forma el río Guascorán.

Como parte de los trabajos de campo para el presente estudio, se realizaron levantamientos batimétricos en la zona de interés, donde se cubrió un área en la zona del canal interno y sus alrededores de 20,56 km², mientras en la zona de mayor azolvamiento en el canal externo fue de 1,96 km² (Planos 1, 2, 3 y 4). Un último levantamiento (2,27 km²) se realizó en la zona próxima a la isla Chuchito, con el objetivo de conocer allí las profundidades y evaluar la posibilidad de creación en esta zona de una isla artificial con el material proveniente del dragado.

El resultado de estos levantamientos, permitió obtener una visión actualizada del fondo en la zona de los canales de navegación y en análisis posteriores, permitirá reevaluar el azolvamiento actual y obtener un cálculo actualizado de los volúmenes de dragado.



Modelo 3D del fondo en la zona del Canal Interno y las Dársenas de Maniobras

Los principales análisis a realizar con los resultados de estos levantamientos se presentarán en informes posteriores con la actualización del volumen de dragado, ubicación de zonas y cálculo de capacidad de nuevos recintos confinados en forma de reclamos o islas artificiales y su incorporación a los datos de entrada para los distintos escenarios modelados.

Meteorología y Oceanografía

Según la clasificación de Koppen (McKnight y Hess, 2000), la zona climática donde se ubica la bahía de La Unión es Sabana Tropical Caliente, excepción hecha por el área del volcán de Conchagua, que por efectos de su altura y los cambios meteorológicos que esto produce, se encuentra ubicada en la Sabana Tropical Calurosa (MARN, 2017).

La zona, al igual que el resto del país, se caracteriza por una temporada lluviosa (mayo-octubre) con acumulados superiores a los 200 mm mensuales, llegando a un máximo promedio de 384 mm en el mes de septiembre, el resto del año es bien seco con acumulados que en ocasiones no supera el 1 mm de precipitaciones (MARN, 2017).

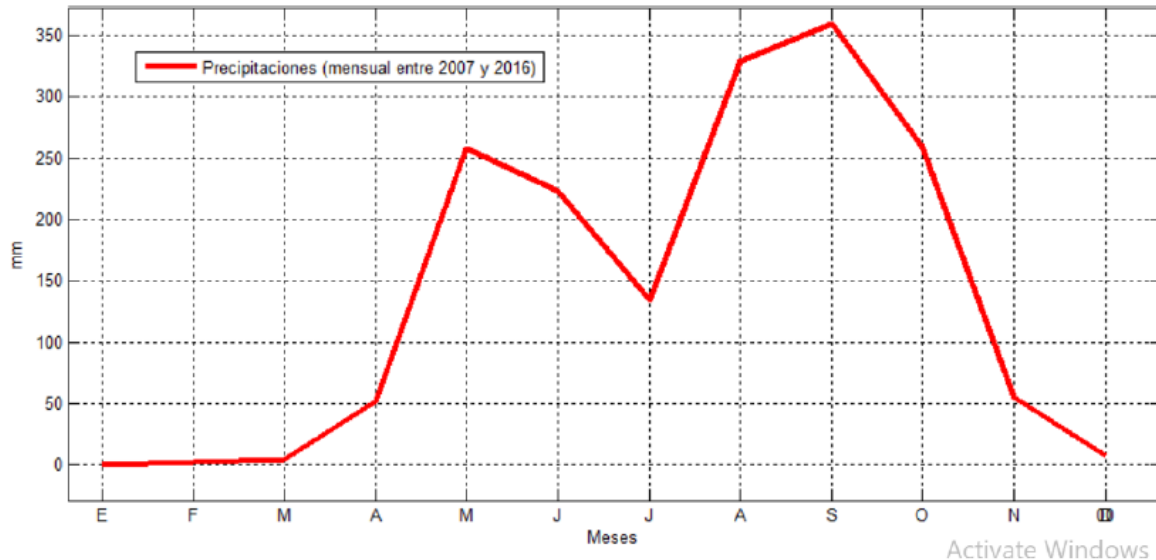
Los rumbos del viento son predominantes del noreste y este, durante la estación seca y del sur en la estación lluviosa, la brisa marina ocurre después del mediodía, siendo reemplazada después de la puesta del sol por una circulación tierra-mar, la velocidad promedio anual es de 9,6 km/h (MARN, 2017).

En la tabla 12, se muestra el resumen histórico del comportamiento de las variables meteorológicas. Como se constató durante los trabajos realizados en la bahía, en cuanto a precipitaciones ocurridas, los periodos de mediciones se comportaron como periodos verdaderamente secos y lluviosos, respectivamente.

Meses	Precipitación (mm)	Viento (km/h)	Dirección Predominante	Temperatura (°C)
Enero	1,5	12,3	E	29
Febrero	0,5	13,1	ENE	29
Marzo	5,6	12,0	E	30
Abril	27,0	12,3	S	30
Mayo	207,6	9,4	S	30
Junio	252,5	7,0	SO	31
Julio	171,9	8,6	E	31
Agosto	228,6	8,0	ESO	30
Septiembre	384,8	7,3	S	29
Octubre	233,3	6,8	SO	29
Noviembre	47,6	7,7	NE	28
Diciembre	4,5	9,7	E	30

*Las estadísticas del viento se basan en observaciones reales de la estación meteorológica en La Unión/Golfo de Fonseca.

De manera que, uno de los aspectos significativos del comportamiento meteorológico y oceanográfico de bahía de La Unión durante el periodo lluvioso, es que las precipitaciones pueden provocar modificaciones en su comportamiento termohalino y en su circulación marina; mientras en el periodo seco, dicha circulación es rigida principalmente por la marea.



Promedio de precipitaciones históricas mensuales desde el año 2007 hasta 2016

También es importante señalar que, durante el periodo lluvioso, las precipitaciones de carácter regional, influyen sobre las aguas del golfo adyacentes a la bahía y estas pueden influir en su dinámica.

Zona	Latitud	Longitud	Rango promedio	Marea promedio	Promedio Pleamar	Promedio Bajamar
La Unión (Cutuco)	87°49'	13°20'	2,46 m	1,52 m	2,75 m	0,29 m

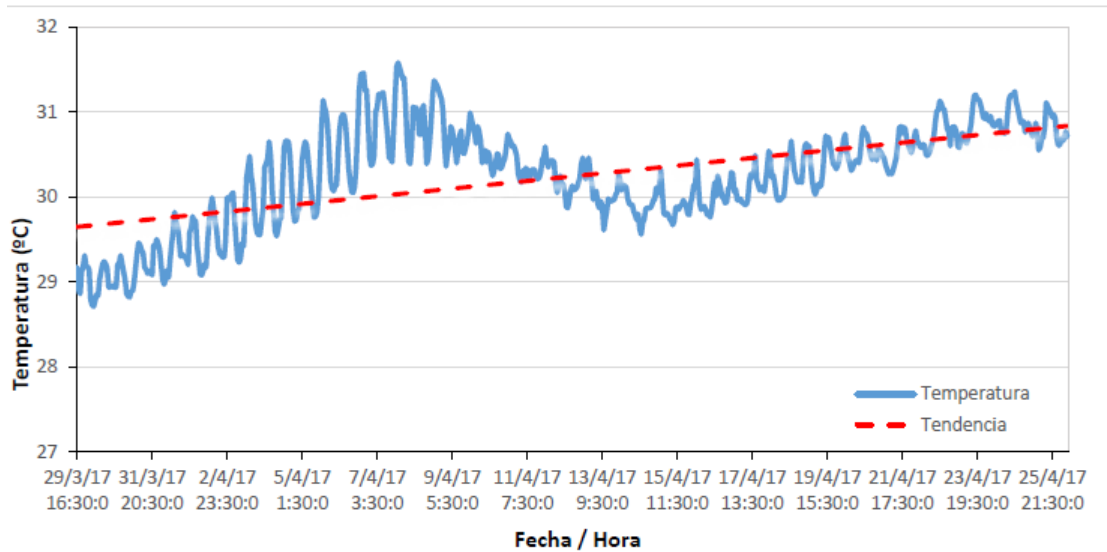
Todos los registros realizados dentro de este estudio, muestran el predominio de variaciones periódicas de marea semidiurna regular, que ocurre entre punta Chiquirín e isla Zacatillo con aproximadamente 35 minutos de adelanto con respecto a las estaciones de La Unión y el sureste de isla Perico.

Lo anterior, coincide con lo expresado por MARN (2012), que estima el tiempo de retardo de la onda de marea entre punta Chiquirín y el noroeste de la bahía, en 33 minutos, por lo que, al final de cada ciclo completo (12 horas y 42 minutos), el nivel del mar sube y baja simultáneamente en diferentes puntos de la misma bahía. Esto último provoca variaciones espaciales y temporales en la magnitud y la dirección de las corrientes.

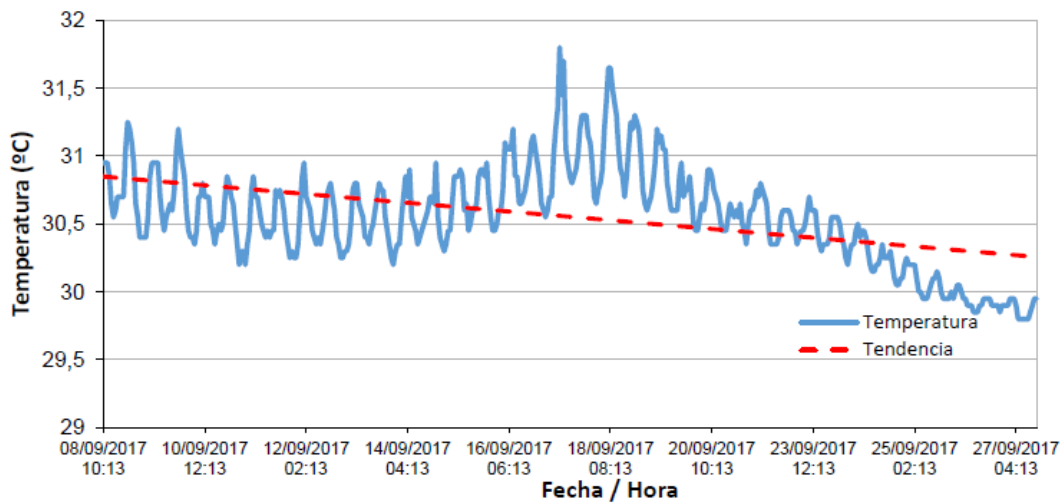
Temperatura del agua y salinidad

Para caracterizar completamente la circulación marina en este cuerpo de agua, rodeado por varias cuencas de agua dulce (JICA, 2006 y MARN, 2012), se decidió analizar, además, del comportamiento de la temperatura del mar, la distribución de la salinidad. Ambas variables son indicadores fundamentales para determinar las zonas más estratificadas o mezcladas de la bahía, si existe influencia de los aportes de agua dulce y su contribución a la dinámica general.

En la bahía de La Unión durante abril de 2016, los valores de temperatura del agua fueron altos y con tendencia a elevarse; con máximos de 30,24 °C que se registraron frente al puerto de La Unión; y su comportamiento espacialmente fue homogéneo.



Comportamiento temporal de la temperatura del mar frente al Puerto de La Unión durante abril de 2017.



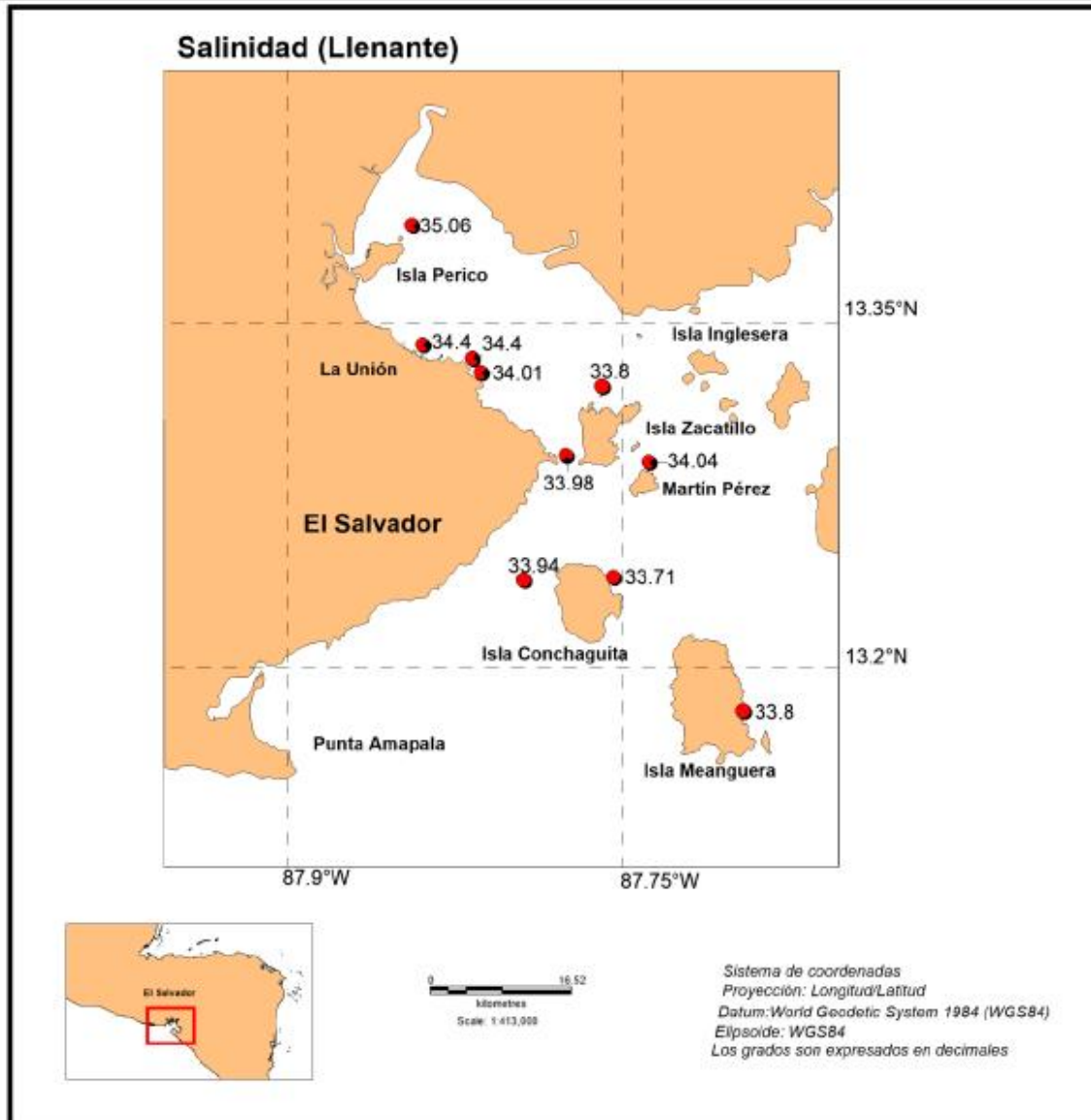
Comportamiento temporal de la temperatura del mar frente al Puerto de La Unión durante septiembre de 2017.

Durante la estación seca, las escasas precipitaciones y la poca influencia del aporte de agua dulce desde los ríos, permiten que la temperatura se mantenga homogénea en una columna de agua poco profunda y mezclada principalmente por el viento. Además, entre el puerto de La Unión y Punta Chiquirín, existen condiciones que favorecen la mezcla horizontal del agua, como son, la ausencia de ríos, el carácter semidiurno regular de la marea y la propia configuración de la bahía.

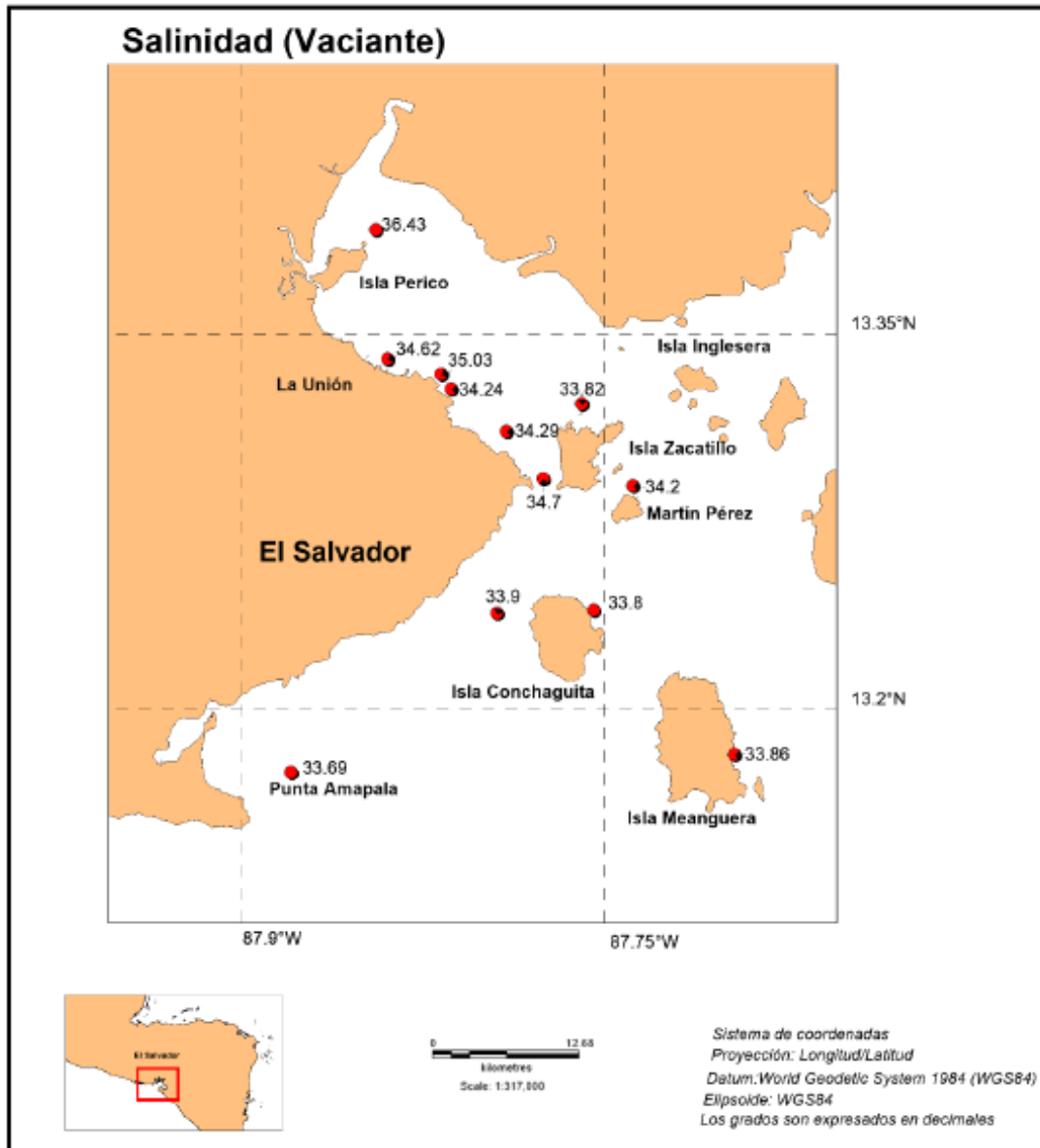
En septiembre del 2017, el valor medio de la temperatura para todas las mediciones realizadas en la bahía, incluidas las estaciones hidrológicas permanentes, fue de 30,0 °C. La tendencia a la disminución de la temperatura del mar en estas estaciones es significativa desde el 16 de septiembre y hasta el 4 de octubre del 2017, fenómeno que se puede asociar a incrementos en las precipitaciones.

Para el mes de septiembre, los valores extremos registrados (máximos y mínimos) de la temperatura del agua, en las estaciones de medición permanente, fueron mayores y menores respectivamente, que durante el mes de abril. No obstante, los promedios, para ambos periodos se mantuvieron alrededor de 30°C, mostrando que no se esperan cambios significativos en el comportamiento de esta variable debido a la estación del año.

Comportamiento de la salinidad en las estaciones de muestreo en la época de seca para la evaluación de la calidad ambiental del Golfo de Fonseca durante el llenante de marea.



Comportamiento de la salinidad en las estaciones de muestreo en la época de seca para la evaluación de la calidad ambiental del Golfo de Fonseca durante el vaciante de marea.

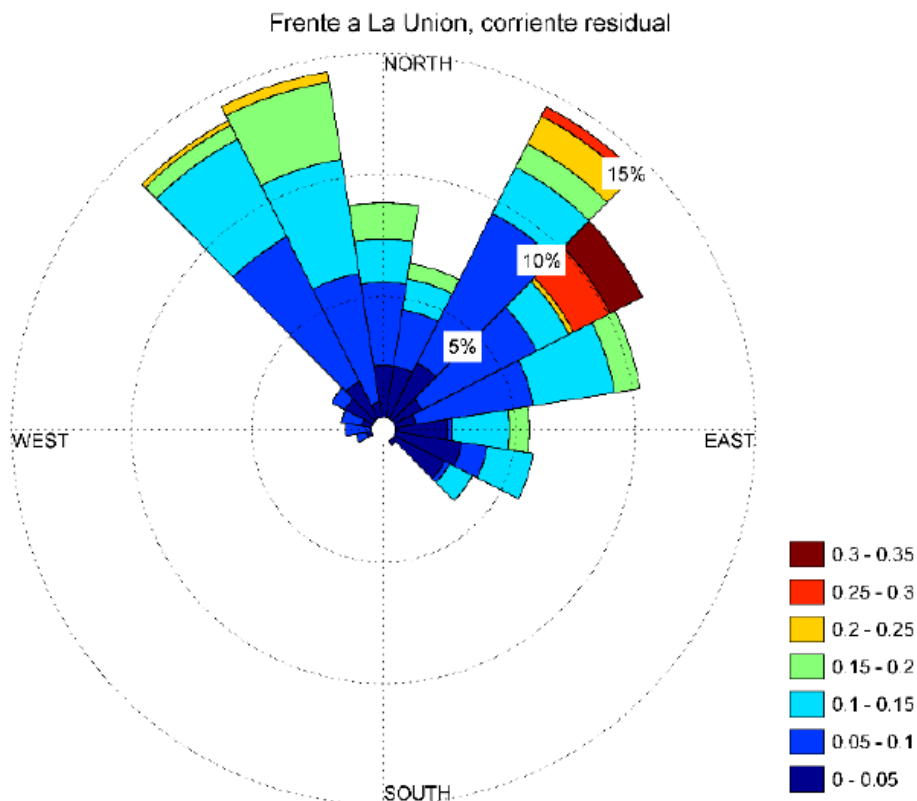


- **Corrientes marinas medidas en la bahía de La Unión**

En la bahía de La Unión, durante el periodo de mediciones de abril de 2017, el cual fue muy seco, la marea predominó en el movimiento de las aguas en escala de horas, determinando el régimen diario de circulación con máximas velocidades de 1,37 m/s (2,6 kn) y medias de 0,50 m/s (1 kn), en superficie, entre Chiquirín y Zacatillo. El movimiento neto (promedio temporal) del agua en las tres estaciones oceanográficas permanentes y en todas las profundidades, fue hacia la salida de la bahía con velocidad máxima media de 0,35 m/s (0,7 kn).

El comportamiento de las corrientes marinas medidas durante septiembre de 2017, mostró valores de corrientes residuales promedio entre 0,25 m/s (0,5 kn) y 0,35 m/s (0,7 kn) en toda la bahía, para las profundidades menores de 12 m y de 1,1 m/s (2,2 kn) entre punta Chiquirín e isla Zacatillo por debajo de esta profundidad. El movimiento neto del agua, por encima de los 12 m, tiene rumbos preferenciales entre el norte y este con las mayores velocidades de 0,35 m/s (0,7 kn), y hacia el sureste, entre esta profundidad y el fondo, con magnitud promedio de 1,1 m/s (2,2 kn) y puede alcanzar los 3,5 m/s (7 kn).

Particularmente, frente al puerto de La Unión, las máximas velocidades registradas en abril, fueron de 1,23 m/s (2,46 kn), con rumbo predominante sureste. Sin embargo, en septiembre se encontraron máximos ligeramente menores de 1,05 m/s (2,1 kn), sin un rumbo predominante único (figura 27 y tabla 14). Además, debido a la influencia de las variaciones de densidad, frente a los puertos de La Unión y Corsain, persisten movimientos hacia la costa salvadoreña, que pueden alcanzar eventualmente los 0,50 m/s (1 kn) con valores mínimos de 0,07 m/s (0,14 kn). Esto último provoca que, las corrientes hacia el noroeste entre Los Negritos y punta Remolino, cambien su rumbo hacia el oeste, con mayor o menor magnitud en dependencia de la hora de marea.



Rosa de corriente residual (m/s) en el canal interior (frente al puerto de La Unión Centroamericana) durante septiembre de 2017.

Resumen de los resultados de las mediciones de las corrientes marinas en la bahía de La Unión. (Estación seca abril de 2017 / estación de lluvias septiembre de 2017)

Estaciones	Max (m/s)	Min (m/s)	Media (m/s)	Dirección predominante	Desviación Estandar (m/s)	Profundidad (metros)	Fecha de muestreo
Amatillo	1,18	0,01	0,42	-	0,24	3	abril/17
Frente al puerto de La Unión	1,23	0,005	0,41	SE	0,23	2	abril/17
	1,08	0,03	0,36	SE	0,21	8	
Los Negritos	1,37	0	0,51	SE	0,35	5	abril/17
	1,37	0	0,62	SSW	0,33	15	
	1,13	0	0,62	SW	0,30	24	
Frente al puerto de La Unión	1,05	0	0,35	Igual frecuencia hacia el NNW q hacia el NE	0,22	8	Septiembre/17
Amatillo	1,06	0,05	0,26	NNE	0,21	5	Septiembre/17
Los Negritos	1,40	0,05	0,41	ENE	0,24	5	Septiembre/17
	1,30	0,05	0,53	ENE-NNE	0,37	12	
	3,46	0,05	0,61	SSE	0,36	24	

En general, los valores de corrientes marinas medidos en ambos periodos, muestran similitud en cuanto a la distribución horizontal de los máximos y mínimos, y son coincidentes los rumbos predominantes de componente sur en profundidades superiores a los 12 m.

Sin embargo, en las tres estaciones de medición permanentes, en un periodo muy seco como lo fue de abril de 2017, toda la columna de agua circuló preferencialmente con rumbos de componente sur, mientras que, durante el periodo lluvioso, en profundidades menores a los 12 m, predominaron el rumbo noroeste entre punta Chiquirín e isla Zacatillo, el norte al sureste de isla Perico y de componente norte en el canal interior (frente al puerto de La Unión).

En las aguas poco profundas de la mitad norte de la bahía, por encima de la ubicación de los puertos Corsain y La Unión, predominaron las corrientes de densidad o calmas, en dependencia de la menor o mayor entrada de agua dulce desde los ríos Guascorán y Sirama, y del viento.

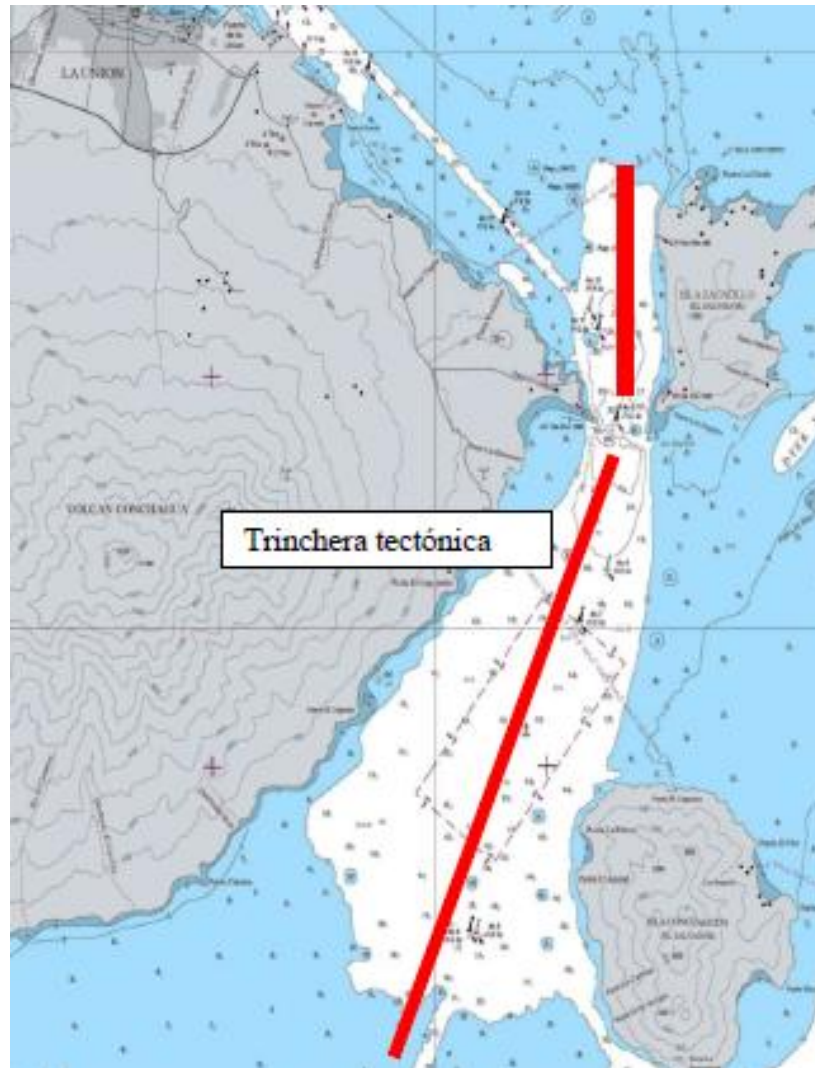
Geología y Sedimentología de la Bahía de La Unión

Los trabajos y artículos revisados acerca de la Geología del Golfo de Fonseca, ponen en evidencia que el escenario geológico en el que se ubica el Puerto de La Unión, corresponde a formaciones relativamente recientes del Holoceno y a otras algo más antiguas del Pleistoceno y el Mioceno, compuestas principalmente por materiales efusivos, ácidos, tobas ácidas, tobas ardientes con intercalaciones de riolitas e intermedias básicas.

En general, el Golfo de Fonseca está rodeado por materiales de la Formación Cuscatlán perteneciente al Pleistoceno, compuesta por rocas efusivas básicas e intermedias (principalmente lavas basálticas y andesíticas), con bajo o ningún contenido de sílice. Al oeste y rodeando estos materiales de la Formación Cuscatlán, se encuentran materiales de la Formación Bálsamo que pertenecen a épocas del Pleistoceno temprano y al Plioceno, pero también son rocas básicas e intermedias, con las mismas características de las rocas de la Formación Cuscatlán, que, por su mayor edad geológica, están más intemperadas. Estas son rocas que se meteorizan o intemperizan en un tiempo relativamente corto, constituyendo una fuente de material a los procesos actuales de sedimentación de la bahía.

En las áreas planas que circundan todo el Golfo de Fonseca, aparecen depósitos sedimentarios del Cuaternario, pertenecientes a la Formación San Salvador, constituidos por depósitos de estuarios que se localizan cerca del mar, cubiertos por vegetación de mangles o formando playas. Estos materiales costeros de origen lacustre y fluvial, muestran algunos depósitos de carácter calcáreo y cuentan con intercalaciones de productos piroclásticos, que indican su contemporaneidad con la actividad volcánica joven.

Desde el punto de vista morfológico, el Golfo de Fonseca resulta una gran cuenca tectónica que se encuentra en el cruce de tres líneas estructurales, con dos pilares en los volcanes de Cosigüina en Nicaragua y Conchagua en El Salvador y definida por el geólogo alemán Sapper, como una "Cuenca Tectónica de Depresión".



**Carta náutica 21530 del puerto de La Unión, 2010. Profundidad en metros.
(Preparada y publicada por National Geospatial-Intelligence Agency. USA).**

En la propia carta batimétrica, se observa como la trinchera termina abriéndose nuevamente hacia la extensa plataforma del interior de la bahía con el predominio de profundidades menores a 7 m, observándose un canal con profundidades superiores (entre 7 m - 8 m), con un ancho que oscila entre 1 000 m y 1 500 a lo largo de la costa salvadoreña de la bahía y se extiende, haciéndose más angosto, hasta sobrepasar la ciudad de La Unión en las inmediaciones de la isla Perico.

Caracterización de los Sedimentos de la Bahía de La Unión

Uno de los aspectos más importantes para realizar la evaluación ambiental y la factibilidad técnica de ejecución de las obras de dragados, es la caracterización física y el nivel de contaminación de los sedimentos, aspecto este último que se aborda a profundidad en el capítulo V.

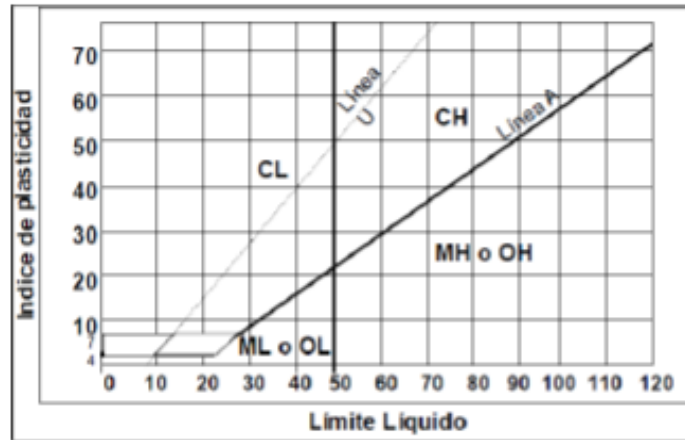
Esta distribución del muestreo, siguió el criterio de caracterizar principalmente los sedimentos de los canales y la dársena de maniobras, las muestras de la 1 a la 8, se corresponden con el material que será dragado y se le realizaron los análisis de granulometría, gravedad específica, contenido de materia orgánica y límites de Atterberg. Además, a la muestra B, correspondiente a la zona al norte de la isla Chuchito y la R, río Guscorán, se le realizaron análisis de granulometría. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 15.

Según los resultados obtenidos, existe una gran homogeneidad en los sedimentos presentes en la bahía, predominando las fracciones finas con contenidos de materia orgánica que varían entre un 8 y 11%.

Resultados de los Ensayos realizados a las muestras de sedimentos

Muestra	Granulometría			D ₅₀ (mm)	Materia Orgánica (%)	Gravedad Específica	Límites		
	Arena (%)	Limos (%)	Arcillas (%)				Líquido (LL%)	Plástico (LP%)	Índice (IP%)
1	50	26	24	0,075	8	2.50	76	35	41
2	8	53	39	0,006	11	2.49	104	51	53
3	9	52	39	0,006	9	2.55	130	46	84
4	27	41	32	0,012	8	2.50	109	43	66
5	15	50	35	0,008	8	2.53	110	49	61
6	20	51	29	0,011	8	2.49	108	43	65
7	16	58	26	0,011	8	2.51	103	44	59
8	8	52	40	0,006	9	2.50	85	48	37
B	16	57	27	0,011	-	2.52	124	50	74
R	59	25	16	0,079	5	-	-	-	-

Carta de Plasticidad de Casagrande para la clasificación de suelos de granos finos



Linea A = 0,73 (LL - 20)
 Linea U = 0,90 (LL - 8)

Clasificación de los suelos según el Gráfico de la Carta de Plasticidad de Casagrande para clasificación de granos finos (ASTM, SUCS).

Muestra	Clasificación ASTM (SUCS)*
1	Mezcla de arena y arcillas de muy alta plasticidad, color gris oscuro, (SM-CH)
2	Limo Arcilloso de plasticidad extremadamente alta, muy bajo porcentaje de arena (8%), color gris oscuro, (OH)
3	Arcilla Limosa de plasticidad extremadamente alta, muy bajo porcentaje de arena (9%), color gris oscuro, (CH)
4	Arcilla Limosa de plasticidad extremadamente alta, con un 27% de arenas, color gris oscuro, (CH)
5	Limo Arcilloso de plasticidad extremadamente alta, con un 15% de arenas, color gris oscuro, (OH)
6	Arcilla Limosa de plasticidad extremadamente alta, con un 20% de arenas, color gris oscuro, (CH)
7	Limo Arcilloso de plasticidad extremadamente alta, con un 20% de arenas, color gris oscuro, (MH)
8	Limo Arcilloso de plasticidad muy alta, con un 8% de arenas, color gris oscuro, (MH)
B	Limo Arcilloso de plasticidad extremadamente alta, con un 16% de arenas, color gris oscuro, (MH)
R	Arena limosa muy fina. No se realizaron análisis de límites para esta muestra

Como se puede observar, todas las muestras clasifican indistintamente como Limos Arcillosos y Arcillas Limosas orgánicas (OH, CH), con la excepción de la muestra 1, correspondiente al canal interno, que clasificó como una mezcla de Arena Fina con Limos Arcillosos (SM-CH).

Se debe señalar que los resultados obtenidos, sobre todo en cuanto al contenido de finos y los límites líquidos (LL), plástico (LP) e índice de plasticidad (IP), son elementos importantes para la toma de decisiones en cuanto al equipamiento a utilizar, zona de disposición, posible aprovechamiento del material, etc.

Estos resultados confirman la imposibilidad de usarlos en rellenos estructurales, coincidiendo con la recomendación hecha por el Laboratorio de Suelos y Materiales SA de CV, en el mes de junio de 2013, por lo que la decisión de su confinamiento solo perseguirá el objetivo de utilizar la zona como depósito y su aprovechamiento más probable será para la creación de nuevos hábitats para especies de la zona.

Transporte de sedimentos y sedimentación

Para realizar el análisis del comportamiento de los sedimentos en la Bahía de La Unión, es muy importante tomar en consideración la velocidad y dirección de las corrientes, la salinidad y las características de los sedimentos.

Como se describe en el epígrafe anterior, los sedimentos en esta zona tienen un alto índice de plasticidad, considerándose a su vez como cohesivos, los cuales tienen la característica que sobre ellos actúan fuerzas de atracción entre las partículas, predominando las electroquímicas, que amplifican el efecto de la gravedad sobre el fondo. Estas peculiaridades, disminuyen la posibilidad de que se pongan en suspensión al formar conglomerados que muchas veces alcanzan altos niveles de impermeabilidad. Las partículas que lo conforman, de forma individual, son muy pequeñas, por lo que tienden a unirse entre ellas en función de su composición mineral y la química del agua, en particular la salinidad, pues entre mayor es esta, más cohesivos tienden a ser (CEM, 2002).

La forma principal de movimiento de este tipo de sedimentos es como lodo fluido. Este es un estado o movimiento intermedio entre la suspensión y la deposición, el cual, puede seguir la

misma dirección del flujo siempre que la configuración del fondo lo favorezca, pero no resulta extraño que, ante un cambio en la configuración de las pendientes del fondo, este siga direcciones opuestas o tienda a sedimentarse. Se forma como resultado de presiones excesivas del agua sobre los poros entre las partículas y se genera cuando aumenta la velocidad de la corriente, se producen cambios en la salinidad o por la acción del oleaje. Debido a cualquiera de estas causas o la combinación de ellas, el agua logra penetrar a través del sedimento depositado, creándose un exceso de presión, capaz de soportar el peso. El conjunto de la masa de sedimentos atrapado y el agua, forman una mezcla uniforme de alta densidad como un fluido viscoso, el cual, fluye pendiente abajo o en la dirección del flujo de la corriente. (CEM, 2002)

Lamentablemente, en el presente estudio no se contó con el equipamiento necesario para detectar y cuantificar esta capa de lodo fluido, la cual fue reportada en otros estudios realizados por ECOH Corporation durante las asesorías SAPI (2009), pero conociendo el patrón de circulación de esta bahía, así como los cambios de salinidad detectados durante la estación de lluvias, queda claro que este fenómeno es típico de este lugar.

Durante los trabajos en la estación seca, se realizaron varias inspecciones y muestreos de buceo, sin que resultara evidente la existencia de una capa de lodo fluido, aunque sí se pudo observar un permanente transporte de sedimentos en las capas más cercanas al fondo, pero sin llegar a tener la densidad para considerarse como una capa de lodo fluido. Sin embargo, en la estación de lluvia, sí se observó este fenómeno durante las inspecciones a los equipos de medición de corrientes y los muestreos realizados para evaluar la calidad de las aguas y los sedimentos de la bahía.

Análisis del Estudio de Sedimentación de la Bahía de La Unión

ECOH Corporation, en su informe de 2009, plantea que:

“Los procesos de sedimentación en canales y dársenas de puertos son inducidos por varios mecanismos en general, señalando tres como los dominantes en este proceso:

- 1. Arrastre de los sedimentos por el efecto del rozamiento con el fondo del oleaje y las corrientes.*
- 2. Suspensión de sedimentos por la turbulencia generada por el oleaje y las corrientes, aportes y deposición al debilitarse las corrientes*
- 3. Corrientes de densidad en la capa de lodo fluido por el efecto de la gravedad.”*

Continuando con lo expuesto por esta empresa en su estudio, se descarta que el primero de los mecanismos afecte los canales del puerto, pues este se produce solo en fondos de arenas medias y gruesas.

En cuanto al segundo, se aplica para sedimentos compuestos por granos finos, como arena fina y limos, los cuales son fácilmente puestos en suspensión debido a la turbulencia generada por las corrientes y el oleaje. Estos pueden ser transportados a grandes distancias hasta que precipitan por efecto de la gravedad. Si el fondo es regular y uniforme, el movimiento en suspensión y la sedimentación se mantiene balanceado sin producir cambios en las profundidades. Por el contrario, si una porción del fondo es profundizada, disminuye la fuerza de rozamiento y se pierde la suspensión del sedimento, que seguirá una tendencia a acumularse en esa zona.

El tercer mecanismo se produce en lugares donde el fondo está cubierto por una capa de lodo fluido. De manera natural, el lodo fluido se arrastra a grandes distancias si encuentra condiciones de gradiente adecuadas; un gradiente de 1 en 100 o menor es suficiente para inducir este movimiento.

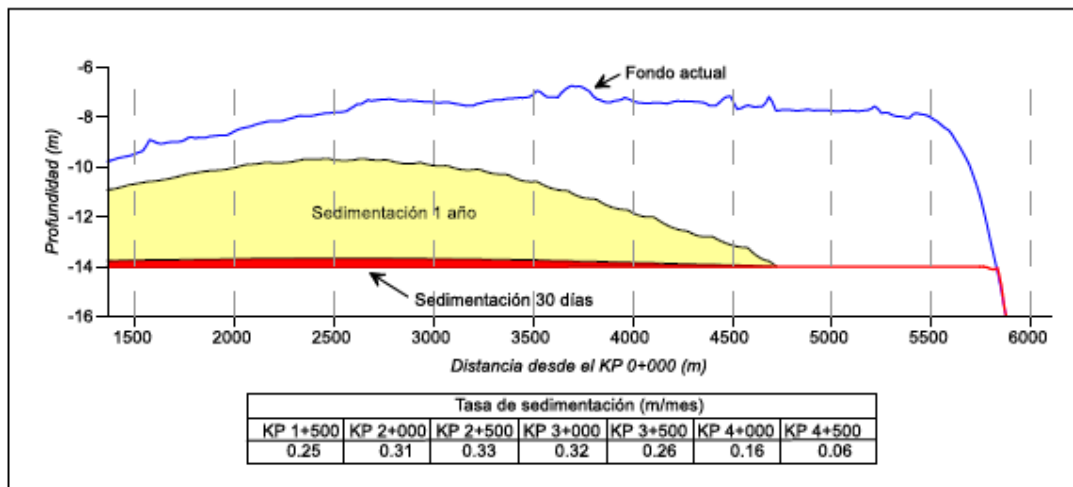
Este mismo informe de 2009, señalan en este tercer aspecto, el error de estimación para la sedimentación de los canales por parte de la empresa Nippon Koei LTD CO., al utilizar la modelación de sedimentación ofrecida por la empresa británica HR Wallinford. En esencia, según se explica en el informe de ECOH Corporation, la modelación estuvo enfocada solo en los mecanismos de sedimentación a partir de la suspensión generada por el oleaje y las

corrientes, a pesar de reconocerse el alto riesgo de que se produjera la fluidificación del sedimento y con ello el relleno de los canales. También se señala que este error pudo estar generado por no tener información confiable de los estudios geotécnicos para cuantificar el movimiento del lodo fluido y con ello hacer una estimación correcta de la tasa de sedimentación.

Realizar hoy una estimación efectiva de la tasa de sedimentación resulta un proceso complejo. Los especialistas japoneses realizaron sus estimaciones con la realización de batimetrías continuas y con la aplicación de modelos numéricos, sin embargo, ellos mismos explican que los datos con que contaban eran insuficientes y que los resultados solo se debían tomar como un análisis preliminar, recomendando nuevos dragados y mediciones constantes para obtener resultados más confiables.

En cualquier caso, queda claro que mantener las profundidades de los canales de acceso resulta un proceso complicado debido a las altas tasas de sedimentación, subestimado durante las etapas de factibilidad y diseño del puerto, y que la causa principal de este fenómeno está más relacionada con el movimiento de los sedimentos en las capas de fondo que con los que se encuentran en suspensión.

Sedimentación en la sección longitudinal del canal interno



Conclusiones

Tomando estas secciones como referencia de la sedimentación esperada para el canal interno, una vez dragado hasta la profundidad de 14 m, se puede calcular un volumen de 83 630,30 m³ en 30 días y de 1 422 627.00 m³ para un año.

Como se puede observar, el modelo describe de manera acertada la sedimentación que ha ocurrido desde su construcción el canal interno, sin embargo, no sucede lo mismo con las zonas de las dársenas de maniobras, donde la construcción de los frentes de atraques ha contribuido al aumento de las corrientes y con ello un cambio en el equilibrio entre los procesos erosivos y de sedimentación, aspecto que no puede ser descrito debido a la resolución de las modelaciones.

De estos resultados se desprende la necesidad del correcto entendimiento de los procesos de transporte de sedimentos en la bahía para la propuesta de soluciones efectivas. Si bien los aportes de los ríos y el sedimento en suspensión tienen una fuerte influencia en el azolvamiento de los canales, la existencia de capas de lodos fluidos tiene una importancia capital, por lo que cualquier diseño de obras o dragados de mantenimiento debe tener en cuenta este fenómeno.