

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

DIAGNÓSTICO PLAYA LA SERENA

EDUARDO GONZÁLEZ¹, LUIS ZAMORANO²

1. RESUMEN

En el estudio se analizó el transporte de sedimento y sus agentes forzantes en la playa de La Serena. En base a la información generada se pudo determinar un retroceso sistémico en los últimos 10 años de aproximadamente 1m/año para esta playa, en base a estimaciones satelitales (González et al., 2021). A medio plazo los sedimentos que alimentan la playa disminuyen generando un desbalance entre sus aportes y sumideros, asimismo los eventos de marejadas y tsunamis generan retrocesos parciales de la costa. El desbalance dinámico del sistema es generado por una disminución significativa de los aportes de sedimentos del Elquí a la bahía en los últimos 20 años. Varios agentes pueden influir en dicha disminución, identificándose tres agentes principales: 1) Megasequía de la última década, 2) la construcción del embalse Puclaro y 3) la sobreexplotación de áridos. Se requiere estudios más profundos en la zona de la cuenca para establecer la importancia de cada uno de ellos. También en el presente trabajo se incorporó una novedosa metodología para la proyección del retroceso de la línea de costa incorporando los efectos del oleaje y las mareas, en escenarios de cambio climático, la cual puede ser extrapolada a otras bahías similares. Al considerar los efectos del cambio climático, si la descarga de sedimento sigue igual a lo observado en los últimos 20 años, la línea de costa tendería a disminuir aproximadamente 20 m a medio siglo (2040) y 80 m para fin de siglo (2100).

¹Ingeniero de proyectos, Instituto Nacional de Hidráulica /eduardogonzalez@inh.cl

²Ingeniero de proyectos, Instituto Nacional de Hidráulica /luiszamorano@inh.cl

2. INTRODUCCION

En la última década, han ocurrido a lo menos dos eventos históricos de marejadas (oleaje extremo) que han quedado presentes en la opinión pública, lo que ha generado la preocupación por el deterioro y la erosión de la costa, así como por las inundaciones generadas en la Avenida del Mar (Winckler et al., 2017) y el tsunami ocurrido el año 2015 que causaron un retroceso de la línea de costa. De esta manera, la Dirección de Obras Públicas encargó el estudio que permita diagnosticar y promover posibles obras de mejoramiento que eviten y atenúen la erosión costera. El objetivo del estudio es diagnosticar y analizar el comportamiento morfológico de las playas, integrando las variables más importantes y sus relaciones a fin de generar el entendimiento del sistema, estableciendo un modelo de funcionamiento y de la evolución de estas que permita generar una propuesta para el plan de control de erosión y manejo de sedimentos.

El presente documento presenta el desarrollo del modelo Conceptual de la playa, aplicado a toda la Bahía de Coquimbo. Es muy importante establecer que el sistema costero es altamente complejo, de modo que es un área de investigación actualmente. Por ese motivo, para llevar a cabo los análisis y la conceptualización del problema es necesario recurrir a varias simplificaciones, sobre todo pensando en un horizonte de mediano a largo plazo, utilizando para ello una metodología basada en elementos semi-empíricos.

Para determinar el comportamiento sedimentario de la Bahía de Coquimbo, el enfoque utilizado es el un balance másico, identificando las fuentes y sumideros de sedimento que tiene la playa. El estado sedimentológico de una playa tiene una relación con el equilibrio entre sus pérdidas y los aportes, de modo que sea relativamente nula, cuando la proporción de pérdidas de sedimentos es mayor la playa estará en un estado erosivo, por el contrario, cuando la proporción es menor la playa estará en estado de acreción.

3. METODOLOGIA

3.1 Balance de sedimentos y Modelo conceptual

El esquema general de balance de sedimentos es presentado en la figura 1, en este se detallan todos los componentes que determinan el balance de sedimentos al interior de la Bahía de Coquimbo (volumen de control). Al interior del volumen de control pueden existir flujos de sedimentos entrantes definidos como los aportes o fuentes y flujos salientes (sumideros o retiros)

Aportes: Considerando como base del análisis conceptual el balance de sedimentos, se han identificado los siguientes aportes de sedimentos desde el punto de vista conceptual.

- Ríos: Son por lejos los que tienen un peso significativo mayor en el balance de sedimentos. Los aportes a la playa se generan durante los eventos de crecidas, en donde el río posee una caudal suficiente para romper la barra y entregar una cantidad significativa de sedimentos. En el presente estudio se ha identificado tres fuentes, de estos es el río Elqui, es el que presenta el aporte más significativo de los tres.
- Acantilados. En la zona norte de la bahía se encuentra la punta Teatinos, la cual podría considerarse como un acantilado, aunque está más bien formada por rocas. Del análisis de las fotografías se pudo constatar que no hay evidencias de retroceso, lo que es suficiente

para suponer que es un promontorio estable. De este modo su aporte se considera pequeño o nulo.

- Aportes Laterales: La deriva litoral, que en el caso de la costa chilena es preferencialmente hacia el norte, es el mecanismo más importante para la distribución de sedimentos a lo largo de la costa. En este sentido, la deriva de sedimentos en la costa se puede considerar tanto un ingreso (fuente) como una salida (sumidero). En el caso particular de la zona de estudio, la existencia del promontorio de Punta Teatinos limita el escape de sedimentos, mientras que la península de Coquimbo impide el ingreso por el sur, quedando de esta manera la bahía como un elemento aislado, sin aportes laterales, que se define como una celda litoral.

Sumideros: Los sumideros en este caso más importantes son:

- Cañones sumergidos: Los cañones sumergidos actúan como sumidero, representan verdaderas cuencas en donde el sedimento cae, al igual que un río este mecanismo transporta el sedimento fuera de la acción del oleaje. No se identifica este tipo de estructuras en la bahía
- Transporte longitudinal: Igual al caso de un aporte, el transporte lateral puede representar un sumidero y fuente de intercambio entre celdas vecinas. Sin embargo, la península y el promontorio rocoso impiden en este caso el intercambio.
- Transporte eólico: De existir vientos importantes, y de ser éstos hacia tierra, puede existir un transporte significativo de sedimentos tierra adentro.
- Transporte Transversal: cuando existen eventos muy extremos, como tsunamis, o marejadas estas son capaces de generar corrientes (rip currents) que pueden transportar sedimentos a aguas muy profundas más allá de la profundidad de cierre.

Cabe mencionar que no se tienen registros de intervenciones antropogénicas en la costa como dragados, obras de restitución. De esta manera, la variación del volumen de sedimento en la playa vendrá dado por el balance de los flujos correspondiente a los aportes y los sumideros.

3.2 Evolución de la playa

La metodología de cálculo de evolución de la playa se basa en los supuestos de ortogonalidad de movimientos longitudinales y transversales (planta y perfil) y separación de evolución de la playa en escalas de largo plazo (años), medio plazo (estaciones).

Sea $X = X(H, T, \theta, z, Q)$ la posición en sentido perpendicular a la línea de costa, donde el oleaje es caracterizado por la altura significativa H , el período medio T y la dirección media θ , z corresponde al nivel medio del mar respecto del NRS actual y Q representa el aporte sedimentario. El origen desde el cual se mide X coincide con un punto fijo y fácilmente identificable (e.g. borde del muro colindante con la Avenida).

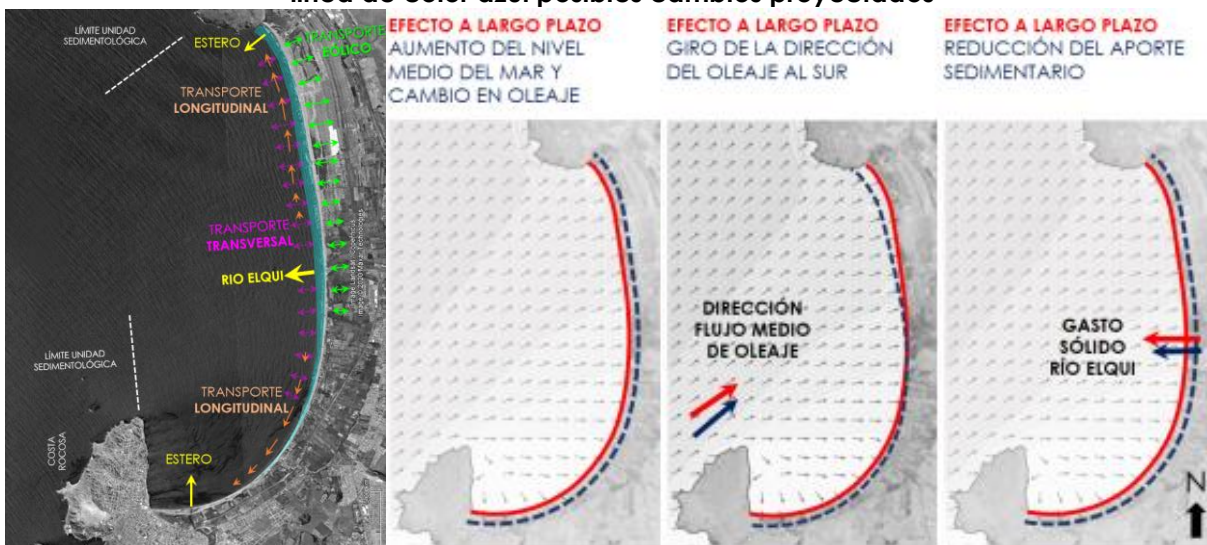
Para evaluar el cambio de la posición de la línea de costa entre un período histórico (1985-2020) y las proyecciones a medio siglo (2026-2045) y fin de siglo (2081-2100), se asume que estas 5 variables son independientes. Luego, el cambio entre las proyecciones y el período histórico se calcula mediante la expresión del diferencial

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial x}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial x}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial x}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial x}{\partial Q} \Delta Q \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial H}(H_p - H_h) + \frac{\partial x}{\partial T}(T_p - T_h) + \frac{\partial x}{\partial \theta}(\theta_p - \theta_h) + \frac{\partial x}{\partial Z}(Z_p - Z_h) + \frac{\partial x}{\partial Q}(Q_p - Q_h) \quad (2)$$

Donde el subíndice p representa proyección y h representa al período histórico.

Figura 1: Esquema del balance de sedimentos, adaptado de Roseti y Krauss 1999, cambios de la línea costa asociados a fenómenos a mediados y fines de siglo. Línea de costa actual en rojo, línea de color azul posibles cambios proyectados



Fuente: Patricio Winckler, 2020.

3.3 Oleaje

En este estudio se propagó el oleaje usando el modelo SWAN. El modelo utiliza la batimetría obtenida a partir de la base de datos GEBCO, cartas náuticas y en aguas someras, la campaña de medición en la Bahía de Coquimbo realizada por la DOP. En el modelo numérico se utilizan como forzante los datos del pronóstico de oleaje generado a través de un modelo implementado en WAVEWATCH III, mientras que los datos de viento se obtienen del pronóstico generado con el NOAA/NCEP Global Forecast System. La calibración y validación se basa en mediciones de ADCP obtenidas de la campaña realizada entre el 28/09/2019 y el día 30/10/2019. Una vez que el modelo numérico ha sido calibrado, se procede a propagar la estadística de oleaje de aguas profundas para el periodo entre 1979 y 2020.

Para caracterizar el oleaje en la bahía se realizaron análisis de clima medio y extremo de oleaje, realizando agrupamiento y un análisis de frecuencia de la altura significativa de oleaje utilizando el método Peak Over Threshold (POT) para la selección de las tormentas, respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos de la altura del oleaje se calculó la profundidad de cierre, que es la mínima profundidad para la cual no se producen cambios significativos en el fondo marino debido a procesos de transporte litorales, y el flujo medio de la energía de oleaje que es la tasa media de transferencia de energía por unidad de ancho a través de un plano vertical perpendicular a la dirección del oleaje. La profundidad de cierre se puede estimar mediante la siguiente expresión (Hallermeier, 1981) a lo largo de la bahía, donde d_c es la Profundidad de cierre

respecto al promedio de las mareas bajas, H la Altura significativa excedida 12 horas por año, T es el Periodo peak asociado a H_{12} y g la Aceleración de gravedad.

$$d_t = 2.28H_{12} - 68.5 \frac{H_{12}^2}{gT_s^2} \quad (3)$$

$$F_e = EC_g \quad (4)$$

Para el análisis de las proyecciones del cambio climático se utilizaron las modelaciones numéricas realizadas en el marco del estudio realizado para el MMA (Winckler et Al. 2019), para mediados de siglo (2026-2045) y fin de siglo (2081-2100) de 6 modelos climáticos globales. El oleaje fue generado mediante el modelo WAVEWATCH III a partir de vientos superficiales y concentraciones de hielo marino extraídas desde modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 (Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados), los espectros de oleaje fueron extraídos en una posición frente a Coquimbo (S 31°, W 73.5°). Todas las series temporales de estados de mar fueron corregidas por sesgo mediante la metodología propuesta por (Lemos et al., 2020)¹. Los resultados obtenidos en aguas profundas fueron propagados mediante una función de transferencia basado en la aproximación de (Camus et Al., 2011) usando toda la serie de data disponible. La propagación se realizó para toda la bahía de modo de poder determinar el cambio de éste en la bahía misma producto del cambio climático.

La altura significativa para la proyección (p) será modelada mediante una amplificación de la curva histórica de tormentas históricas, mediante la utilización de un amplificador que depende del periodo de retorno, donde los subíndices p corresponden a proyección obtenida a partir de 6 modelos climáticos globales (Winckler et al., 2019) para el período histórico (1985-2004) y la proyección a medio siglo (2026-2045) y la altura significativa histórica (h) según la siguiente expresión:

$$H_p = F(T_r)H_h \quad (5)$$

$$F(T_r) = \frac{H_p(T_r)}{H_h(T_r)} \quad (6)$$

3.4 Estimación de la línea de costa

El análisis de línea de costa contemplado involucra la descarga de imágenes desde el año 1995 al 2020, a fin de generar una data histórica, aplicado la herramienta denominada "CoastSat" (Vos et Al, 2019). Esta herramienta, en base a los datos satelitales disponibles y mediante el acceso de imágenes satelitales por medio de Google Earth Engine, es capaz de inferir la posición de la línea de costa en base algoritmos de inteligencia artificial, proporcionando una solución de bajo costo para obtener observaciones históricas de los cambios en la línea costa, con una resolución

¹ Los resultados de los modelos climatológicos globales exhiben errores sistemáticos, cuando se comparan con datos de observaciones, reanálisis y hindcasting, siendo las metodologías de corrección de sesgo es un procedimiento estándar en los estudios de cambio climático

de ~ 10 m. Los resultados para la Bahía de Coquimbo fueron elaborados y presentados en por (González et al., 2021).

El retroceso o avance de la línea litoral a mediados y fines de siglo se calcula mediante la fórmula de Brunn (Brunn, 1962), la cual depende del cambio del nivel del mar y de las condiciones de oleaje por medio de la profundidad de cierre. El análisis de la forma de planta de la Bahía se realiza a partir del modelo parabólico de equilibrio (Hsu & Evans, 1989).

3.5 Hidrología

El análisis hidrológico busca poder estimar el volumen de sedimentos totales (suspensión más arrastre de fondo) transportados hasta la playa de la Serena en promedio por año ($m^3/año$), lo cual se realiza considerando su relación con los caudales líquidos. Para estimarlo se realiza una cuantificación de los caudales líquidos basado en tres estaciones de la DGA que cuentan con información hidrometeorológica: Río Elqui en Algarrobal, ubicada aguas arriba del embalse Puclaro; río Elqui en Almendral, ubicada justo aguas abajo del embalse; y río Elqui en La Serena, la cual se ubica en la desembocadura de la cuenca, en una de esas estaciones se dispone además de mediciones del gasto sólido en suspensión, con lo cual pudo experimentalmente obtenerse la siguiente relación entre el caudal sólido y líquido.

$$Q_{ss} = 1574,2Q^2 \quad (7)$$

Donde Q_{ss} caudal sólido en suspensión en $kg/día$ y Q caudal Medio diario en m^3/s , para estimar el transporte de sólido de fondo se usaron por una parte los antecedentes del sedimento acumulado en el embalse Puclaro, basados en un estudio batimétrico del fondo del embalse Puclaro realizado por Prommra de la U. de La Serena, donde se determinó que el embalse ha perdido un 0,37% de su capacidad desde el inicio de su operación hasta el 2018. Por otra parte se usa la estimación de la densidad aparente del sedimento transportado en suspensión y en el fondo en base al estudio del Consorcio de Ingeniería INGENDESA - EDIC (1994), en donde se estima que la densidad aparente del sedimento en suspensión y de fondo sería igual a 1.200 kg/m^3 y de 2.200 kg/m^3 , respectivamente. Además, en ese estudio se determinó que el caudal sólido de fondo se considera igual al 15% del que ocurre en suspensión.

De esta manera, la estimación del caudal sólido en la estación Río Elqui en La Serena se realiza considerando los sedimentos en suspensión y de fondo por separado. Para el caudal sólido en suspensión se utiliza la estadística rellenada de caudal líquido obtenido previamente en conjunto con la Eq. 7. Para el gasto sólido de fondo se utiliza el porcentaje del 15% asumido previamente. Se estima que este valor podría ser menor, ya que la pendiente media de la cuenca ubicada aguas abajo del embalse Puclaro es menor que la ubicada aguas arriba, sin embargo, con los antecedentes que se disponibles, no era posible cuantificar este efecto por lo que se opta por mantener el valor del 15%. En ambos casos se consideran las densidades aparente propuestas.

3.6 Morfodinámica

Para estimar la erosión se realizaron simulaciones numéricas utilizando el modelo Xbeach, considerando una tormenta extrema y representativa de un evento de 100 años de periodo de retorno. las proyecciones morfológicas para fines y mediados de siglos, tal como es señalado en la metodología oleaje, se amplificó la altura del oleaje y considera un aumento del nivel del mar

(0.15 y 0.60 m) para cada periodo. Los resultados obtenidos se presentan para el área de Calle Cuatro Esquinas y el Norte del Faro de la Serena

3.7 Corrientes

Para abordar también con el mejor detalle posible la bahía de Coquimbo, se usa un enfoque tradicional basado en modelos acoplados: MIKE21 HD + SW, y Telemac 2D - TOMAWAC - SISYPHE. Los modelos del DHI son usados como herramienta preliminar para determinar campos de corrientes aproximados, y entender la dinámica costera. El modelo Telemac está acoplado con modelos promediados de oleaje (TOMAWAC), y con un modelo morfológico (SISYPHE) el cual permite estimar en forma bidimensional las modificaciones morfológicas. De esta manera los escenarios de modelación considerados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Casos de modelación.

Caso	Oleaje			Nivel de Mar	Marea	
	Altura	Periodo	Dirección		Astronomica	metereologica
1	Tr = 10 años	T medio	Media	Actual	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
2	Tr = 50 Años	T medio	Media	Actual	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
3	Tr = 100 Años	T medio	Media	Actual	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
4	Tr = 500 Años	T medio	Media	Actual	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
5	Evento 2015	Evento 2015	Evento 2015	Actual	Evento 2015	Promedio tormentas
6	Evento 2017	Evento 2017	Evento 2017	Actual	Evento 2017	Promedio tormentas
7	Tr = 10 Años (2040)	T medio- modelado	Media	IPCC 8.5 - Prom. (2019)	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
8	Tr = 50 años (2040)	T medio- modelado	Media	IPCC 8.5 - Prom. (2019)	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
9	Tr = 100 Años (2040)	T medio- modelado	Media	IPCC 8.5 - Prom. (2019)	Pleamar Máxima	Promedio tormentas
10	Tr = 500 Años (2040)	T medio- modelado	Media	IPCC 8.5 - Prom. (2019)	Pleamar Máxima	Promedio tormentas

3.8 Transporte eólico

El transporte eólico de arena permite determinar el volumen de la arena transportado por efectos del viento. Las formulaciones empleadas son descritas en el CEM Parte III, obteniendo el umbral de la velocidad del viento para el inicio del transporte de arena y las velocidades de corte para mediciones de vientos de los últimos 7 años. El transporte eólico de arena se desarrolla a lo largo del fetch de la playa, el cual está limitado por el mar en un extremo y por otro lado la playa, motivo por el cual solo se consideran las direcciones de vientos provenientes del 3er y 4to cuadrante.

3.9 Nivel del mar

Para la obtención de las oscilaciones armónicas de las mareas (constituyentes armónicos), se analizaron los datos de nivel mar desde agosto del 2008 a Junio 2020 cada 1 hora de la estación de mareas de Coquimbo (Lat: -29.94; Lon: -71.33), obtenidos de la de la página web de la

UNESCO, sea level station monitoring facility (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>). Los datos del nivel del mar obtenidos fueron procesados eliminando valores sin sentido físico (datos escapados), y errores instrumentales de la serie de tiempo. El análisis armónico fue realizado mediante la utilización del algoritmo UTide (Codiga, 2011).

La marea meteorológica fue obtenida a partir de las variaciones residuales del nivel del mar asociadas a eventos de oleaje, para ello se seleccionaron alturas significativas superiores a un 1 metro, desde junio del 2011 a mayo 2020, obtenidos de la propagación de oleaje en nodo cercano a la estación mareográfica, seleccionando un total de 14 eventos de oleaje.

El nivel del mar proyectado es obtenido mediante el documento de determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile (Winckler et al., 2019), este considera un aumento del nivel medio del mar en 0.15 m para medio siglo (2026-2045) y 0.60 m para fin de siglo (2081-2100).

4. RESULTADOS

4.1 Oleaje

A partir de los resultados generados por el modelo numérico, fueron obtenidos los parámetros estadísticos en 50 nodos ubicados al interior de la bahía (aguas profundas y someras) considerando el Hindcasting de más de 30 años. Respecto de altura significativa esta varía entre 0.5 y 1.4 m, los valores superiores a 1.0 corresponden a la zona norte, la más expuesta. La zona central de la bahía tiene con valores medios superiores a 1.0 m. Mientras que la zona más protegida, la zona sur, se obtiene una altura significativa que en promedio es menor a 1.0 m. El periodo peak no varía significativamente a lo largo de la costa, aunque presenta valores levemente mayores hacia el sur. La dirección media indica que el oleaje tiende a orientarse de manera perpendicular a la línea de la costa debido al efecto combinado de la refracción y la difracción del oleaje en casi toda la bahía, finalmente se determinó que la dirección del flujo medio de energía oleaje a su entrada tiene una dirección de 256° .

Los valores de la profundidad de cierre obtenidos en 20 perfiles a lo largo de la bahía presentan variaciones 1.16-8.39 m, obteniendo los menores valores en el sur de la bahía y las mayores profundidades en la zona norte de la bahía.

En relación al oleaje extremo, en la zona central se obtiene una altura significativa espectral de de 3.8 m para periodos de retorno de 100 años y para periodos de retorno de 20 años la altura significativa es de a 3.3 m.

Respecto de las proyecciones de cambio climático usando el escenario de emisión más desfavorable, los resultados muestran en la bahía cambios marginales. Por ejemplo, respecto los valores obtenidos para el flujo medio de energía a fin de siglo es de ($255,96^\circ$) y mediados de siglo es de ($255,74^\circ$). Es decir prácticamente similar al caso actual, por lo tanto, resulta razonable suponer que no hay un cambio significativo hacia finales de siglo, por lo que el perfil de equilibrio sería prácticamente el mismo, al suponer que la playa no va a pivotear.

4.2 Corrientes

Las corrientes en condición reinante y dominante, es decir con direcciones de oleaje Suroeste, tienden a presentar una corriente en el sentido del reloj al interior de la bahía. En la zona Sur de la bahía la corriente longitudinal tiene una magnitud menor o nula formando pequeñas corrientes de retorno, incluso con inversión, debido a las alturas de oleaje de poca altura, con baja capacidad de transporte. Mientras que en el Norte de la bahía, la corriente longitudinal es más energética y con una marcada dirección Sur. Para un oleaje proveniente de la dirección Noroeste, la corriente longitudinal Sur se intensifica en toda la parte norte de la bahía, la cual tendría la capacidad de distribuir los aportes de sedimentos del Elqui hacia toda la zona Sur de la bahía.

4.3 Hidrología

Para estimar las tasas de aporte de sedimento se consideran por separado los tres periodos de tiempo: previo a la construcción del embalse (1985-1999), posterior a la construcción del embalse (2000-2010), y posterior al inicio de la megasequía (2010-2017). Esto tiene por objetivo comparar los resultados de las tres situaciones identificadas, de forma de poder analizar el efecto del cambio en régimen de caudales sobre el caudal sólido. Se observa que existe una disminución del caudal sólido total que llega a la costa entre el período previo y posterior al llenado del embalse, siendo ésta mayor durante la megasequía.

Para el periodo previo a la construcción del embalse Puclaro, se calcula que el aporte de sedimento total es de $3,8 \times 10^9$ kg ($2,9 \times 10^6$ m³), mientras que la tasa de aporte de sedimentos anual promedio se estima igual a $2,7 \times 10^8$ kg/año ($2,0 \times 10^5$ m³/año). En el periodo posterior al inicio del llenado del embalse Puclaro y previo a la megasequía (2000-2010) se calcula que el aporte de sedimento total es igual a $4,6 \times 10^8$ kg ($3,4 \times 10^5$ m³). La tasa de aporte de sedimentos anual promedio se estima igual a $4,5 \times 10^7$ kg/año ($3,4 \times 10^4$ m³/año). Por último, en el periodo posterior concordante con la megasequía (2010-2017) se calcula que el aporte de sedimento total es igual a $4,4 \times 10^7$ kg ($3,3 \times 10^4$ m³). La tasa de aporte de sedimentos anual promedio se estima igual a $2,6 \times 10^6$ kg/año ($1,9 \times 10^3$ m³/año).

4.4 Línea de costa

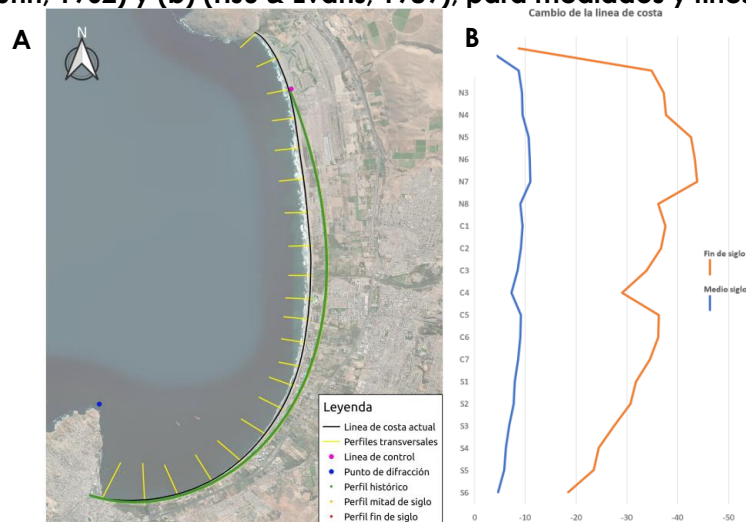
Cuantitativamente el análisis de las 280 imágenes de satélite (González et al, 2021), presentaron un retroceso de línea de costa que varían entre 0.28 y 1.18 m por año, que representa una disminución de 7 a 30 m del ancho de la playa entre los años 1995 al 2020. La disminución del ancho de playa se ve acrecentada en los últimos años, con anchos que varían entre 36 – 58 m, siendo estas disminuciones asociadas principalmente a eventos de marejadas.

Los cambios de la línea de costa por efecto del aumento del nivel mar, son calculados mediante la utilización de la formulación de (Brunn, 1962) considerando variaciones del nivel del mar de 0.15 m a mediados de siglo y de 0.60 m a fines de siglos (Winckler et al., 2019). A mediados de siglo, se observa un retroceso de la línea de costa que varía entre los 2.2 m y 11.0 m, con los mínimos valores de erosión en las extremos norte y sur de la bahía (2.2 m y 4.6 m, respectivamente) y valores máximos al norte de la desembocadura del río Elqui (11.0 m). Los valores promedio de la erosión de la línea de costa a mediados de siglo es de 8.15 m. A fines de siglo el aumento

del nivel mar genera mayores efectos erosivos (figura 3) observando un retroceso de la línea de costa que varía entre los 8.7 m y 43.9 m, los valores mínimos obtenidos se presentan en los extremos Norte y Sur de la bahía (8.7 m y 18.4 m, respectivamente) y sus máximos valores erosivos al Norte de la de la desembocadura de del río Elqui (43.9 m). Los valores en promedio de la erosión de la línea de costa a fines de siglo son de 32.6 m.

Finalmente respecto del pivoteo que puede experimentar la playa, se estima a partir del ajuste de la forma parabólica de equilibrio (Hsu & Evans, 1989) a la línea de costa considera como parámetros de entrada el punto de difracción ubicado en la cercanía de la punta de la península de Coquimbo, en particular a 280 m del Fuerte Lambert y el punto control definido como la ubicación de la línea de costa paralela al frente de olas. En términos generales, se observa que la forma parabólica de equilibrio se ajusta bien a la forma general de la bahía (figura 2), sin embargo, en algunos sectores de la playa la parábola de equilibrio se ubica al interior del continente. Esta condición puede ser explicada por la existencia de descargas de sedimentos (equilibrio dinámico). Cabe indicar que la forma de equilibrio de planta obtenida tiene como consideración que la bahía se encuentra en equilibrio estático, condiciones de nula descarga sedimentaria, lo que muestra por otra parte el efecto de acreción actualmente producto de los aportes del Elquí.

Figura 2: Resultados de los cambios de la línea de costa obtenidas por las formulaciones de (a)(Brunn, 1962) y (b) (Hsu & Evans, 1989), para mediados y fines de siglo.

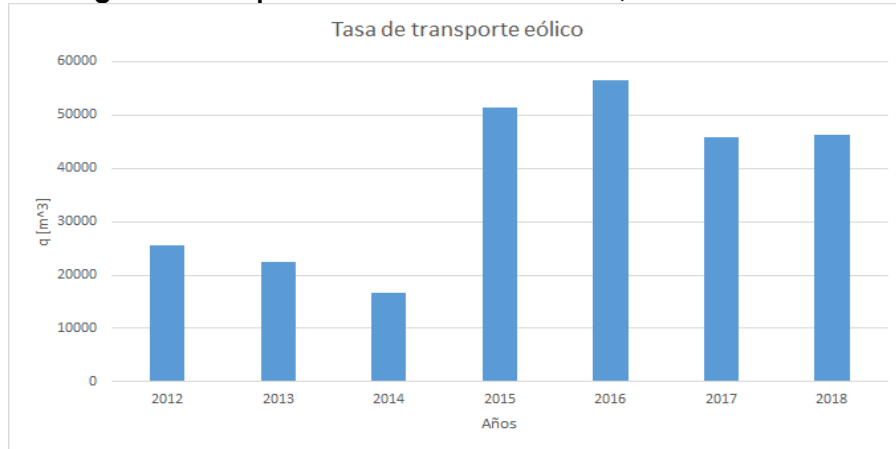


Fuente: Elaboración propia

4.5 Transporte eólico

La tasa de transporte eólico obtenida en la bahía de Coquimbo presenta valores promedios de 37842 m³/año considerando para el análisis los años 2017-2018, con valores que oscilan entre los 17000 y 55000 m³.

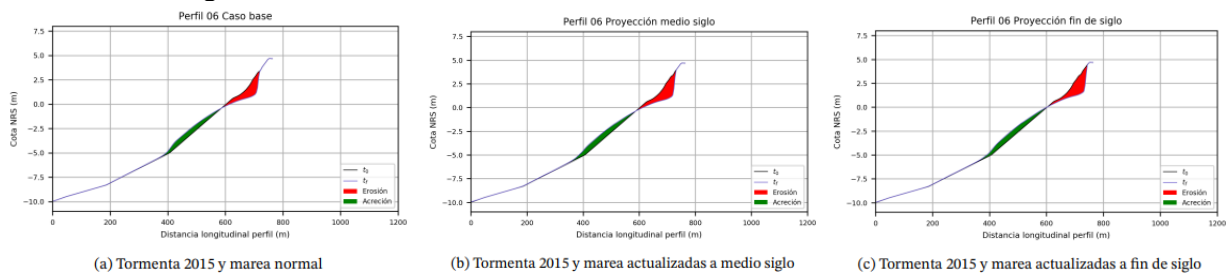
Figura 3: Transporte eólico de arena anual, serie 2012-2018.



4.6 Morfología

Los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas usando el modelo Xbeach, con una amplificación de hasta un 25 % en la altura del oleaje extremo, se observa que con respecto de la posición de la acreción, se puede inferir que está prácticamente no pasa más allá de la profundidad de cierre (figura 4), siendo está ubicada a aproximadamente -6 (NRS) en los perfiles en estudio, esto muestra que una poca cantidad de sedimento se perdería en aguas profundas en eventos extremos a mediados y fines de siglo. De los resultados de erosión se obtiene una pérdida de playa cercana a los 50 m en todos los casos, si bien a medio siglo es esperable una mayor erosión que en el caso base, esta disminuye para finales de siglo. Ante lo observado, se concluye que no se presentan grandes diferencias en el retroceso de la línea de costa frente a eventos extremos por cambio climático.

Figura 4: Resultados modelo Xbeach en la zona del faro de Serena.



Fuente: elaboración propia

Tabla 2: Erosión promedio en la bahía de Coquimbo

Erosión	Casos base (m)	Medio siglo (m)	Fin de siglo (m)
Promedio	48	51	47

4.7 Balance másico

El balance másico de la bahía se realiza para toda la celda litoral. Se han hecho algunas simplificaciones y supuestos los cuales se exponen a continuación.

- Como aporte se considera sólo el aporte del Río Elqui por ser comparativamente mayor a los Esteros Culebrón y Punta Teatinos.
- Se desprecia el intercambio de sedimentos entre la zona más profunda y la playa. A partir del modelo 2D realizado para el evento del 2015 usando el modelo Telemac2D acoplado con oleaje y morfodinámica, se pudo constatar que existe un cierto grado de equilibrio entre sedimento que se incorpora y sale más allá de la profundidad de cierre. Si bien en las simulaciones el transporte neto no es nulo es bajo (miles de m³) y para efectos prácticos se puede despreciar.
- El concepto de intercambio entre celdas litorales es nulo. Es decir, no hay flujos entrantes por el norte, ni salientes por el sur.
- No hay cañones sumergidos.

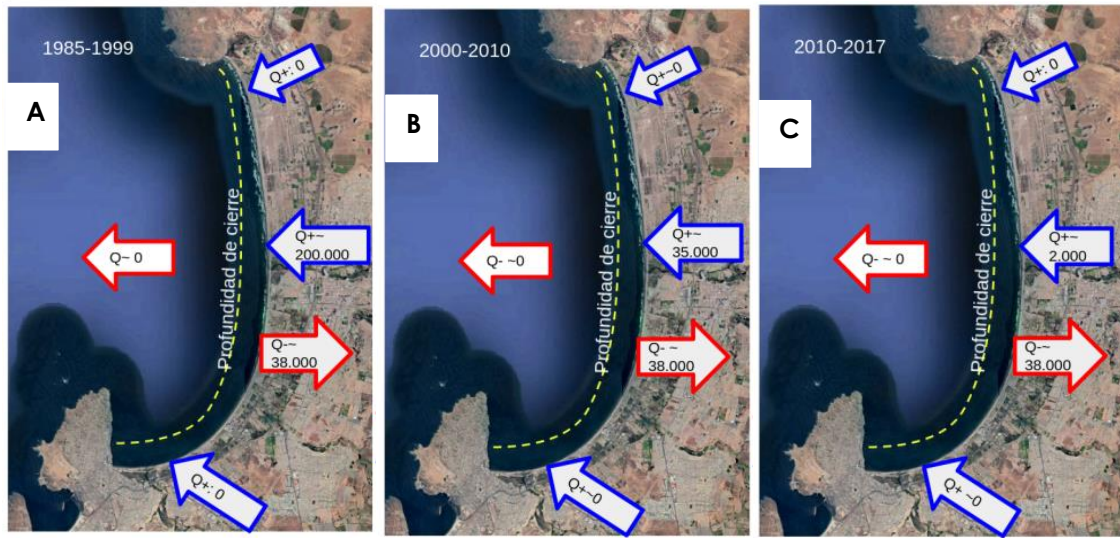
Se desprecia el intercambio de sedimentos entre la zona más profunda y la playa. A partir de los resultados obtenidos por Xbeach, se pudo constatar que existe un cierto grado de equilibrio entre sedimento que se incorpora y sale más allá de la profundidad de cierre. Si bien en las simulaciones el transporte neto es bajo y para efectos prácticos se puede despreciar

De esta manera, el problema se simplifica a que los incrementos de la línea de costa serían producto de los aportes del Elqui, mientras que las pérdidas serían producto de reacomodos locales y pérdida eólica. De este modo, los retrocesos encontrados en el análisis histórico, dan muestra que son relativamente constantes y más evidentes en la última década. Se puede suponer entonces, y correlacionar con el hecho de que no hay registros en la última década de crecidas hidrológicas significativas del Río Elquí, considerándose desde el punto de vista de los sedimentos como un aporte casi nulo.

La Bahía de Coquimbo en los últimos años está constantemente perdiendo material producto del forzante eólico que sobrepasa a los aportes realizados por el Río Elquí, considerando la data disponible se estimó una pérdida de 38.000 m³/año. Entre los años 2010 y 2017 los aportes del Río Elquí han disminuido respecto a décadas anteriores, en donde los aportes en promedio fueron estimados en 200.000 m³/año entre 1985-1999 antes de la construcción del embalse Puclaro y de 35.000 m³/año entre los años 2000-2010.

Por otra parte, un retroceso de 1 m/año de playa, lo que fue estimado para la zona del faro de La Serena, puede ser asimilado a un volumen de 30.000 a 70.000 m³/año, lo que da cuenta que en realidad, el transporte eólico puede ser algo mayor al estimado. Finalmente, respecto del volumen anual que pierde la playa, se pueden considerar razonable un rango de 10.000 - 50.000 m³/año de pérdida, como base. Esto obviamente se compensa con las crecidas del Río Elqui.

Figura 5: (A) Balance sedimentario periodo de 1985 al 1999 antes del embalse Puclaro. (B) Balance sedimentario periodo de 2000 al 2010 posterior al embalse. (C) Balance sedimentario periodo de 2010 al 2017 efecto de la megasequía. Color rojo las pérdidas y color azul los aportes



Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados se ha podido determinar el estado actual y proyectar cambios en la evolución de la línea de costa para la Bahía de Coquimbo. El primer aspecto importante de mencionar es que la playa está en equilibrio dinámico, es decir, la posición de la línea de costa depende del balance de los aportes y sumideros en el tiempo. Lo anterior se ha podido verificar considerando el perfil de equilibrio y el análisis de los perfiles transversales a lo largo de la bahía.

Es importante recalcar que el aporte más relevante de sedimentos corresponde al Río Elquí, el cual es transportado a lo largo de toda la bahía por la acción del oleaje, lo anterior es fundamentado en la uniformidad de la granulometría existente y los resultados de los modelos numéricos.

Se evidencia la enorme importancia del balance sedimentario, en particular de los aportes al sistema para el control de la erosión en toda la bahía. Los resultados del análisis de la línea de costa, efectuados en el horizonte de las últimas 2 décadas, se ha podido identificar un retroceso de la línea de costa en la zona de estudio (entre el Faro y Cuatro esquinas), la que se ha estimado en aproximadamente 0.28-1.18 m/año. En la última década también se ha podido identificar una disminución de los caudales líquidos del río Elqui, el que puede atribuirse a los efectos de la mega sequía en la zona, donde los registros hidrológicos desde el 2004, muestran una importante disminución de los caudales extremos. En efecto, los registros muestran que las últimas crecidas del Río Elquí (2017) los caudales máximos fueron del orden de 85 m³/s, los que resultan poco significativo desde el punto de vista de los aportes sedimentarios a la playa (7.800 m³/año), para su equilibrio en el tiempo, dejando en evidencia que el déficit hidrológico en el Río Elquí repercute negativamente en la playa.

En efecto, considerando los efectos del cambio climático, se realizaron estimaciones de las variaciones generales de la línea costa a medio y fin de siglo, las que nos permiten realizar las siguientes conclusiones:

- Las variaciones del flujo medio de energía de oleaje son despreciables, considerado la mediana de la dirección de propagación. Esto significa que el perfil de equilibrio es el mismo, es decir, no hay efectos en la línea de costa producto del cambio a futuro de esta variable.
- Las variaciones de la altura de oleaje asociados a un mismo evento extremo (100 años) pero considerando los efectos del cambio climático en la altura, no generan cambios importantes de la línea costa para mediados y fin de siglo (modelación numérica Xbeach).
- Las variaciones del nivel del mar para mediados y fines de siglos, presentan valores en promedio de erosión de 8.15 m y 32.6 m respectivamente (Brunn, 1962). Si la descarga de sedimento se mantuviera constante a lo observado en los últimos 20 años, la línea de costa tendería a disminuir aproximadamente 20 m a medio siglo (2040) y 80 m para fin de siglo (2100), según lo observado del análisis de línea de costa satelital (erosión de 1 m por año desde el año 2000).

Estos variaciones nos permiten cuantificar los cambios en conjunto de las variables antes mencionadas, bajo una situación conservadora y considerando las descargas (aportes) de sedimentos similares a como se ha observado los últimos 20 años, estimando retrocesos de aproximadamente 30 m a mediados de siglos y 110 m a fines de siglo.

Es esperable, que una crecida importante ocurra en el transcurso de los años, quizás el supuesto más fuerte es la megasequía. A pesar de lo anterior, existen también dos factores antropogénico en la cuenca del Elquí que empeora el problema, que son la extracción de áridos y el Embalse Puclaro.

Respecto de las proyecciones en la zona de estudio, el ancho de la playa de 80 m aproximadamente desde el muro de la calle hasta la línea de alta marea obtenidos del análisis satelital y considerando los valores obtenidos de erosión para mediados y fines de siglo, se puede concluir que, a mediados de siglo, los eventos extremos serán capaces de erosionar la totalidad del frente de la playa, probablemente llegando hasta el borde de la Av. del Mar, presentando erosiones no vistas hasta la fecha. La condición será peor para fines siglos, ya que los efectos erosivos generados podrían eliminar en su totalidad el ancho de playa de la zona de estudio, si no se realizan medidas de mitigación en el mediano plazo y largo plazo.

Finalmente cabe mencionar que el efecto más importante en el retroceso se proyecta para mediados de siglo es la falta de disponibilidad de sedimentos atribuible a tres grandes factores: Una megasequía de la zona, la extracción excesiva de áridos del Río Elquí y el efecto en la parte alta de la cuenca del embalse Puclaro. Cabe mencionar que el efecto del Puclaro será más notorio a largo plazo, mientras que el efecto de la extracción de áridos es algo más visible a corto plazo. De todas maneras, para tener lucidez al respecto se considera realizar más estudios en la cuenca del Elquí.

6. REFERENCIAS

Winckler, P., Contreras-López M., Campos-Caba, R.; Beya, J. y Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 45(4), 622-648.

Lemos, G., Menendez, M., Semedo, A., Camus, P., & Hemer, M. (2020). On the need of bias correction methods for wave climate projections. *Global and Planetary Change* 186.

Paula Camus, Fernando J Mendez, and Raul Medina. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9):851–862, 2011.

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 2: Exposición, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Kilian Vos, Kristen D. Splinter, Mitchell D. Harley, Joshua A. Simmons, Ian L. Turner. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*. Volume 122.104528.

Eduardo González P., Luis Zamorano R., Patricio Winckler W., & Enrique Galecio V. (2021). Aplicación de COASTSAT a la bahía de Coquimbo, evaluación de la línea de costa. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Hsu, J. R. C., & Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(4), 557-570.

Brunn P. Sea-level rise as a cause of storm erosion. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 88:117–130, 1962.

United States. (2006). *Coastal engineering manual*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers. Part III, "Coastal Sediment Processes"

Codiga D. (2011). *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the Utide Matlab Functions*. Narragansett: Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, 59 pp.