

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**APLICACIÓN DE COASTSAT A LA BAHÍA DE COQUIMBO, EVALUACIÓN DE LA
LÍNEA DE COSTA.**

Eduardo González P.¹
Luis Zamorano R.²
Patricio Winckler W.³
Enrique Galecio V.⁴

RESUMEN:

Según los informes del IPCC, y los estudios recientes las playas chilenas estarán afectas a procesos erosivos en los años venideros, resulta entonces relevante disponer de información histórica de la ubicación de la línea de costa. En Chile existe una carencia de mediciones que permitan disponer de las tasas de retrocesos históricas de la costa. El presente estudio busca mostrar las tasas de retroceso históricos en la bahía de Coquimbo y presentar la metodología desarrollada por (Vos et Al, 2019) denominada “CoastSat”, que permite estimar el retroceso de la línea de costa en base a fotos satelitales. Esta metodología es validada en base a mediciones topo batimétricas, encontrando errores del orden de 10-15 m, lo que es coincidente con otros estudios. De esta manera por una parte se presenta una metodología atractiva para ser aplicada a cualquier parte de la costa chilena, en donde no se dispone de información. Por otro lado, se concluye que la playa de la Bahía de Coquimbo está en retroceso, el que se ha acelerado en los últimos años, a tasas actuales de 0.2 a 1.1 m/año.

^{1,2,4} Ingenieros civiles del Instituto Nacional de Hidráulica. eduardogonzalez@inh.cl

³ Profesor Adjunto, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. patricio.winckler@uv.cl

1. INTRODUCCION

Según el IPCC, el aumento del nivel del mar causado por el cambio climático aumentará la erosión costera en todo el mundo, cambiando significativamente las costas y las zonas costeras bajas. Por el lado de la costa, contribuyen a este cambio el aumento de la energía del oleaje medio y extremas, la velocidad del viento oceánico y el aumento del nivel del mar (Winckler et al, 2019). Todos estos estudios sugieren que las zonas costeras estarán expuestas a peligros cada vez mayores en las próximas décadas. Ahora si observamos datos históricos recientes (Arjen Luijendijk et al., 2018) a partir de datos derivados de los satélites, estos indican que el 24% de las playas de arena del mundo se están erosionando a tasas superiores a 0,5 m /año, mientras que el 28% se están acumulando y el 48% se mantienen estables.

De esta manera, se espera que la condición de la erosión vaya aumentando y por eso resulta relevante disponer de antecedentes históricos que muestran la condición presente y pasada, en virtud de los cambios que vendrán. A nivel nacional, la última década ha evidenciado varios casos de eventos extremos que tienen asociados una erosión costera, los cuales han sido de conocimiento público por la prensa y han generado alarma en la población. En ese contexto, y considerando que existe una carencia de estudios en la materia, y mucho más de mediciones a lo largo de la costa, resulta atractivo disponer de una metodología que permita obtener datos históricos de la línea de costa en base a fotografías satelitales.

El presente estudio muestra la aplicación de una herramienta desarrollada recientemente (Vos et Al, 2019) para obtención de datos históricos del movimiento de la línea de costa y su contraste con mediciones de campo, aplicado en la Bahía de Coquimbo en la IV región. En la última década, han ocurrido a lo menos dos eventos históricos de marejadas (oleaje extremo), generando 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; Campos, Beyá & Mena. 2015). De esta manera, y ante la sensibilidad de la comunidad local, la Dirección de Obras Portuarias (DOP) ha solicitado el estudio “Diagnóstico mejoramiento playa La Serena, comuna La Serena”, cuyo objetivo es evaluar el estado de las playas más turísticas de la zona, y proponer a nivel conceptual medidas de mitigación a la erosión costera. Durante el desarrollo de la primera etapa del estudio se pudo constatar que no existen mediciones históricas detalladas de la ubicación de la línea de costa. Ante la carencia de esta información se han desarrollado mediciones en varios perfiles transversales de la bahía de Coquimbo abarcando las zonas mareales y submarinas, en distintos periodos del año. A fin de generar una data histórica robusta, se ha aplicado la herramienta denominada “CoastSat” (Vos et Al, 2019). Esta herramienta, en base a los datos satelitales disponibles, es capaz de inferir la posición de la línea de costa en base a algoritmos de inteligencia artificial, proporcionando una solución de bajo costo para obtener observaciones históricas de los cambios en la línea costa, con una resolución de ~ 10 m. Para validar su aplicabilidad, esta herramienta, es contrastada con las mediciones de campo y ha permitido disponer de antecedentes históricos de la línea de costa, y de la evolución de la playa

en las últimas décadas, como se verá los resultados obtenidos son preocupantes, al evidenciar una erosión sostenida de la bahía de Coquimbo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2 Zona de estudio

La bahía de Coquimbo está ubicada en la IV región de Coquimbo, en el Norte Chico de Chile, limita al norte con la desembocadura del humedal de Punta Teatinos y por el sur con el Humedal el Culebrón con una extensión aproximada de 19 km (Figura 1). Se identifican tres afluentes que desembocan en la bahía el Río Elqui, el Estero Culebrón y la Quebrada Chacay (Humedad Punta Teatinos), Desde el punto de vista de la capacidad de transporte de sedimentos el más importante de ellos es el Río Elqui.

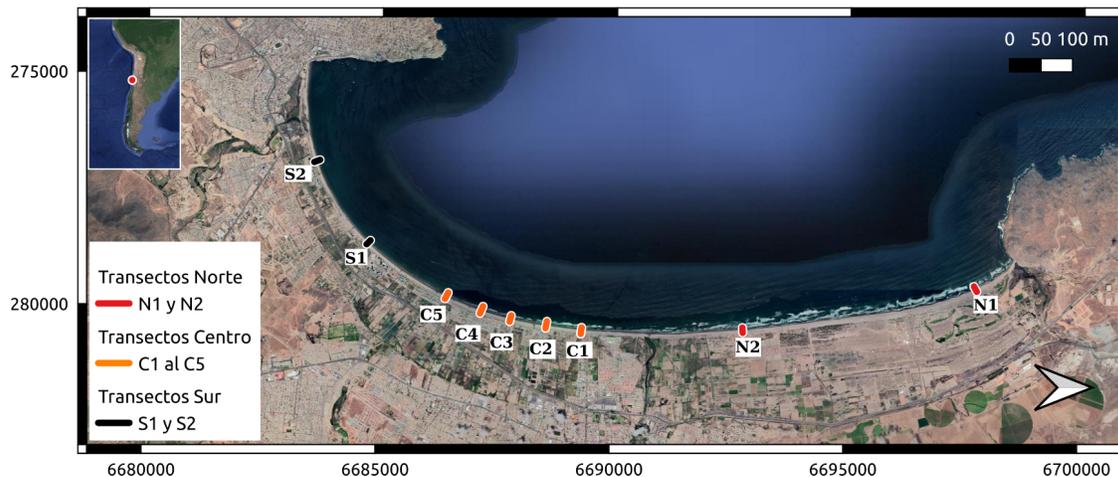


Figura 1: Zona de estudio.

La zona presenta una importante actividad turística. Desde el punto de vista del clima de oleaje, está protegida del oleaje más energético proveniente de la dirección SW, característico de las costas chilenas. Ya dentro de la bahía el oleaje refracta a la costa, siendo la zona sur la menos energética y la zona norte la más energética. Esta gradiente de energía norte-sur induce corrientes litorales que definen la dinámica de los sedimentos. Respecto a la urbanización, la zona norte de la bahía se encuentra menos alterada, presentando dunas de arena y una rica flora local. En cambio, el centro y la zona sur concentran mayormente la actividad antropogénica. De esta manera la zona de estudio se ha dividido en tres macrozonas: la zona sur, de poca energía asociada al oleaje; la zona central, que posee por el sur las playas más apetecidas por los turistas ; y la zona norte, que se encuentra poco poblada y con mayor energía en función del oleaje. Debido al interés económico, este estudio se centra mayormente en la zona central, en donde se

ubican las playas más turísticas y más concurridas. Note que los perfiles tienen como prefijo la zona (S =sur, N = norte y C=centro).

2.1 CoastSat

Para la detección histórica de la línea de costa se empleó el conjunto de herramientas de código abierto denominado “CoastSat” (Vos et Al, 2019), que permiten obtener la posición de la línea de costa mediante la aplicación de un algoritmo, basado en redes neuronales y imágenes proporcionadas por los satelitales Landsat (L5, L7 y L8) y Sentinel-2 en la zona de estudio. Respecto del proceso propiamente tal, es importante mencionar que las imágenes adquiridas son procesadas previamente para eliminar los píxeles nublados y mejorar la resolución espacial, antes de aplicar un algoritmo de detección de la costa. Esta técnica de detección de la línea de costa combina además una clasificación de imágenes supervisada, realizada por el usuario, y una segmentación de borde con resolución de subpíxeles para trazar un mapa de la posición de la costa con una precisión de ~ 10 m.

A continuación se presentan los aspectos más relevantes de la herramienta y su seteo en el marco del presente estudio.

2.1.1 Descarga de Imágenes:

El análisis de línea de costa contempla la descarga de imágenes, en dos ventanas temporales, abarcando desde el año 1995 al 2020 para el análisis histórico, en la zona central de la bahía, y el año 2020 para el estudio de la posición anual, y la validación. Cabe mencionar que no todas las imágenes disponibles de las bases de datos son utilizadas, debido principalmente a la cobertura de nubes. Por otra parte, a partir de las coordenadas de ubicación, la herramienta es capaz de acceder a las bases de datos de imágenes de los diferentes satélites y clasificar todas las imágenes útiles según los criterios de búsqueda. Con respecto a los datos satelitales disponibles públicamente, estos han aumentado progresivamente su resolución en las últimas décadas, con 30 m para las misiones Landsat 4–8 (1982-presente) cada 16 días y 10 m Sentinel-2 (2015-presente) cada 5 días (Vos et Al, 2019), lo que permite actualmente disponer mayor información, si las condiciones atmosféricas lo permiten.

2.1.2 Preprocesamiento de imágenes.

Posteriormente, a las imágenes seleccionadas según el criterio anterior, se le aplica un algoritmo que depura la imagen. El algoritmo busca mejorar la resolución espacial de la imagen de satélite para lograr una detección óptima de la costa. Para las imágenes Landsat 7 y Landsat 8, la banda pancromática de mayor resolución, se utiliza para aumentar la resolución de las bandas, pasando de 30 a 15 m aplicando un método de fusión de datos basado en el análisis de componentes principales e interpolación bilineal. Las imágenes Landsat 5 no tienen una banda pancromática,

sin embargo, las bandas de 30 m se muestran a 15 m por interpolación bilineal, ya que se encontró que esto mejoraba la precisión de la detección de la costa. Para las imágenes de Sentinel-2, la banda SWIR1 de 20 m se muestra a 10 m mediante interpolación bilineal, de modo que todas las bandas tengan una resolución de 10 m.

2.1.3 Clasificación y detección de la línea de costa

Se utilizan redes neuronales (Civco, 1993), en base a la librería de python scikit-learn (Pedregosa et al., 2011) y scikit-image (Van der Walt et al., 2014) para etiquetar cada píxel de la imagen con una de cuatro clases: arena, agua, aguas blancas o otros. El umbral de arena/agua se calcula aplicando el algoritmo de umbral de Otsu (Otsu, 1979), para posteriormente emplear el algoritmo Marching Squares (Cipolletti et al., 2012; Lorensen y Cline, 1987). De esta manera se obtiene una polilínea que representa la interfaz agua-tierra.

2.1.4 Corrección por nivel del mar:

Cada imagen satelital captura una etapa diferente de la marea, por lo tanto, es necesario una corrección de la línea de costa detectada por efectos del nivel del mar. Los datos empleados para obtener la corrección son; los datos del nivel mar disponibles (UNESCO-IOC), en huso horario UTC y la estimación de la pendiente de la playa promedio, obtenida de los datos de campo. La metodología para la aplicación de las correcciones es presentada en (Castelle Et al, 2021).

2.2 Comparación con mediciones de los perfiles.

Con el fin de cuantificar el error en la detección de la ubicación de la línea de costa, obtenida por la herramienta, se realiza una comparación de las mediciones de campo efectuadas en los perfiles transversales con la información satelital más cercana temporalmente. Para efectos de comparación con las mediciones, se determinó en planta la distancia existente entre el punto más alejado del perfil medido y la línea de costa estimada, comparando estas distancias mediante la obtención del error de las mediciones.

Cabe mencionar que existe una importante incertidumbre debido a que no se disponen de las horas en la que se tomaron las mediciones, por lo anterior se utilizó como punto de referencia el nivel medio del mar para la obtención de los perfiles medidos. Por otro lado, con el fin de evaluar si la costa está sujeta a estacionalidad, se realiza un análisis en base a las imágenes satelitales disponibles el año 2020, agrupando los valores en función del tiempo.

2.1.2 Análisis Histórico

Para evaluar la evolución histórica, se ha realizado un análisis considerando todas las imágenes satelitales de que se tenga registro, de este modo se contempla la evaluación de los cambios de la

línea de costa desde el año 1995 al 2020. Después del proceso de clasificación se obtuvo un total de 280 imágenes para la zona central de estudio, en los transectos C1, C2, C3 y C4 . A partir de lo anterior, se obtuvo una cuantificación de las variaciones de la línea de costa y ancho de la playa en función de su distancia desde el inicio de la playa.

2.1 Mediciones de terreno

Mediante levantamientos topográficos de varios transectos perpendiculares a la playa (20 perfiles), se obtuvo la ubicación de la línea de costa para distintos instantes de tiempo. Las comparaciones, entre la herramienta “CoastSat” (Vos et Al, 2019) y los levantamientos topográficos contemplan el análisis de 3 campañas efectuadas el 2020 (en Mayo, Agosto y Septiembre).

3. RESULTADOS

3.1 Comparación con mediciones de perfiles.

La validación y comparación entre el levantamiento topográficos y la línea de costa satelital, es estudiado en 6 perfiles transversales a lo largo de la bahía de coquimbo, N1, N2,C1,C5,S1 y S2 (Figura 1), considerando un total de 53 imágenes para la zona norte, 46 para la zona centro y 43 para la zona sur. Los resultados se presentan en la Figura 2.

La Tabla 1 presenta los errores medios absolutos de la medición satelital con respecto de las mediciones de campo, obteniendo para casi todos los perfiles errores menores a 10 m, correspondientes a los errores de precisión documentados por la herramienta “CoastSat” (Vos et Al, 2019), a excepción del perfil C-1 que presenta errores de más de 20 m en los meses de Mayo y Septiembre. El motivo de esta diferencia, se debe a que dicho perfil presenta la influencia de un desagüe que modifica la detección de la línea de costa, considerando esta área como mojada.

La variación estacional para el año 2020 presenta dos tendencias, una correspondiente a los meses de invierno-primavera y otro para verano-otoño, existiendo en los meses de Abril- Mayo los gradientes más fuertes, esto también es evidenciado en el análisis histórico (Figura 4). La Tabla 2, resume las variaciones estacionales de la línea de costa para el año 2020.

La zona más energética desde el punto de vista del oleaje, que corresponde a la zona norte presenta los mayores rangos de posición de la línea de costa (58 m. en promedio), disminuyendo en la zona central con valores en promedio de 40 m. Los perfiles de la zona sur posee en promedio una distancia de 35.5 m y representa la zona más abrigada de la bahía y la más estable, a excepción de la desembocadura del estero Culebrón que presentan los máximas variaciones producto de los efectos de descarga del estero.

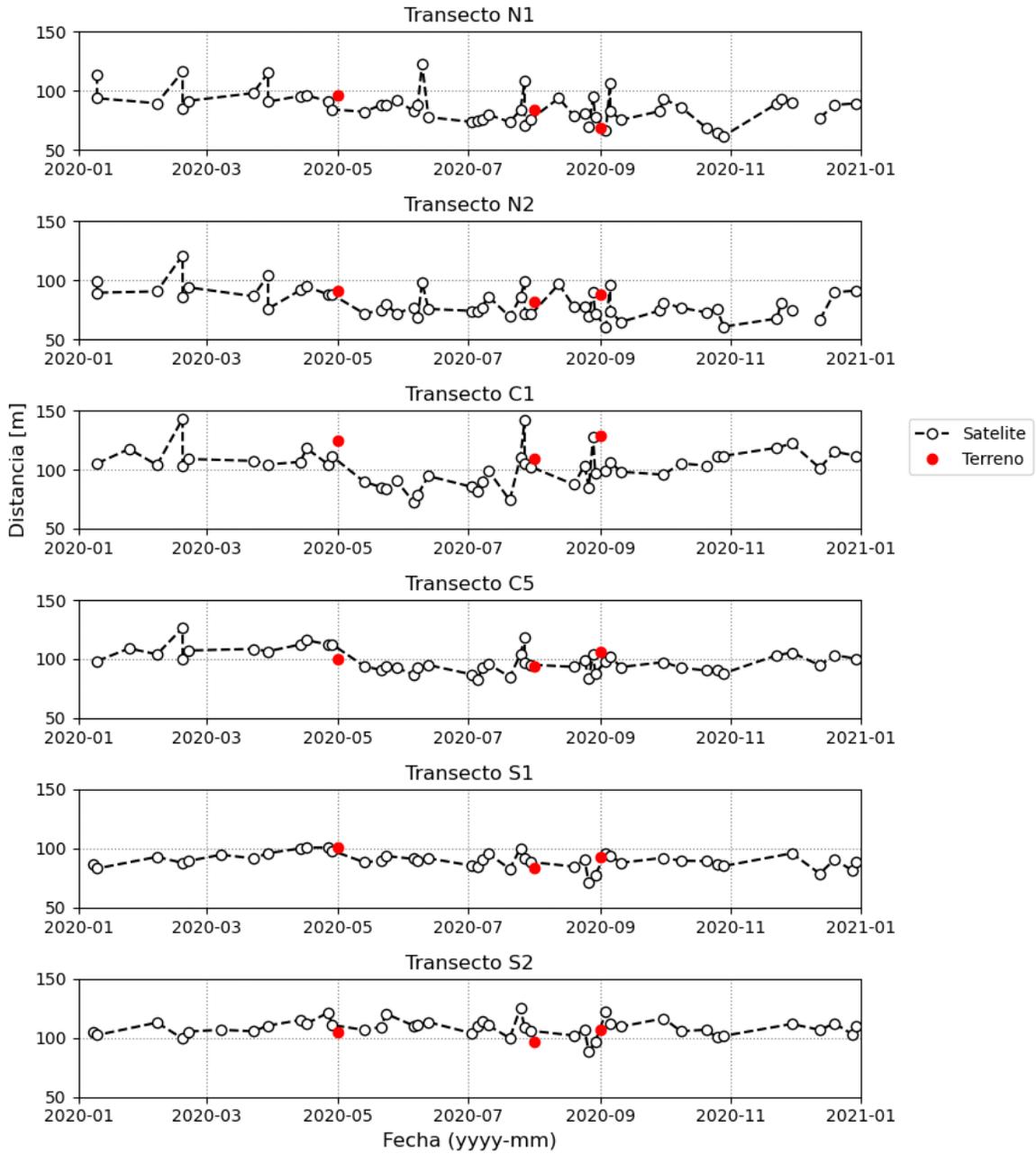


Figura 2: Posición de los transectos N1,N2,C1,C5,S1 y S2 para el año 2020.

Transecto	Mayo 2020			Agosto 2020			Septiembre 2020		
	Terreno (m)	Sat. rango (m)	Error medio (m)	Terreno (m)	Sat. rango (m)	Error medio (m)	Terreno (m)	Sat. rango (m)	Error medio (m)
N1	96	85-91	8	84	79-95	9,5	68,8	66-83	5,7
N2	91	72-88	11	81	70-97	2,5	87,5	61-97	8,5
C1	125	84-91	37,5	109	85-127	3	128,2	96-127	16,7
C5	100	91-93	8	94	84-104	0	105,9	95-102	7,4
S1	100,5	88-94	13	84	72-90	3	92,9	88-96	0,9
S2	104,7	107-120	13,7	96,9	89-106	0,6	107	109-121	8

Tabla 1: Comparación datos satelitales y medidos en los perfiles. Distancia de la línea de costa a punto de referencia en m.

Variación estacional invierno - verano	Zona Norte	Zona Central	Zona Sur
Diferencia estacional máxima (m)	69	54	74 (39)
Diferencia estacional promedio (m)	57.7	39.6	43.2 (35.5)

Tabla 2: Valores promedio de la variación estacional. Los valores en paréntesis corresponden a los resultados sin considerar el estero Culebrón.

3.1 Análisis Histórico.

El análisis contempla la evaluación de los cambios de la línea de costa desde el año 1995 al 2020, mediante la detección por imágenes de satélites, obteniendo un total de 280 imágenes disponibles para la zona central de estudio. Este estudio contempló la evaluación cualitativa en temporada estival e invernal y un análisis de la totalidad de las imágenes, obteniendo una cuantificación de las variaciones de la línea de costa en 4 transectos.

Cualitativamente las variaciones estivales e invernales de la línea de costa, se presentan (Figura 3) en conjunto con la marejadas de 8 de agosto del 2015 que se utiliza como referencia, en ellas se pueden evidenciar un retroceso progresivo desde el año 2000 al 2020, siendo las líneas de costa de color amarillo las más recientes, estas son cada vez más cercanas al faro de la serena, sobrepasando la base de este en época invernal. En la zona central y sur del área de estudio mantienen esta tendencia, con una disminución progresiva del ancho de la playa.

Cuantitativamente el análisis de las 280 imágenes de satélite, en los 4 transectos analizados (Figura 4), presentan una 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 del playa entre los años 1995 al 2020. La disminución del ancho de playa se ve acrecentada en en los últimos años (Tabla 3), con anchos que varían entre 36 - 58, considerando que las distancias obtenidas de los transectos se encuentran referenciadas con respecto al muro que separa la playa y la calzada, siendo estas disminuciones asociados principalmente a eventos de marejadas.

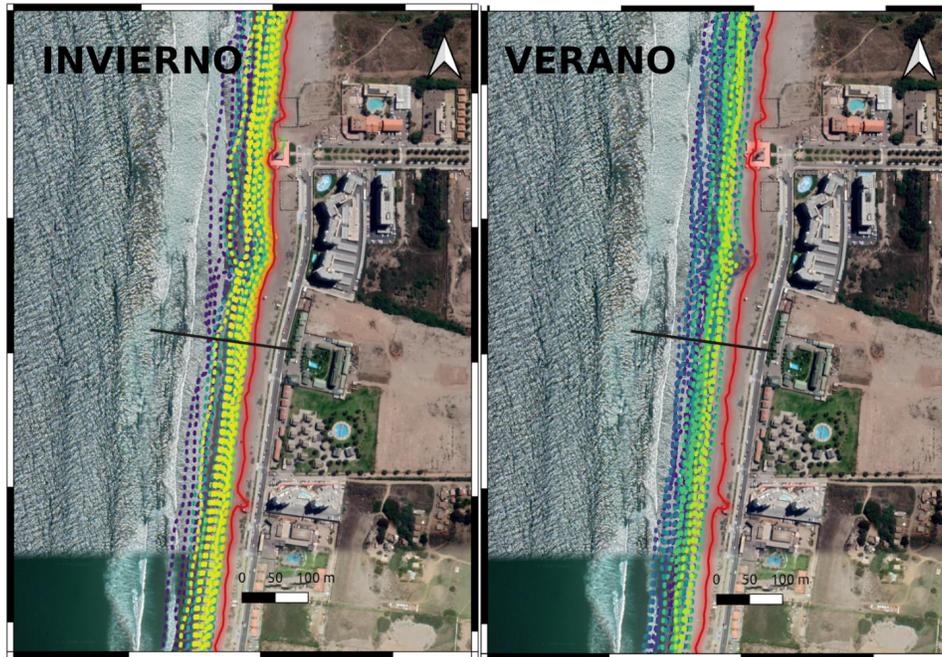


Figura 3: Evolución histórica de la línea de costa para invierno (junio - julio) y verano (enero - febrero). Colores morados referencia más antigua, amarillo referencia más reciente y color rojo marejada de 8 de agosto del 2015.

Transecto	Rango Anual [m]			Distancia del ancho de playa [m]	
	2017	2018	2019	Minima	Año
C1	106	100	129	36	2019-07
C2	84	79	87	44	2017-07
C3	81	115	110	37	2018-05
C4	93	83	68	58	2015-08

Tabla 3: Rangos anuales de la línea costa y distancia del ancho de la playa

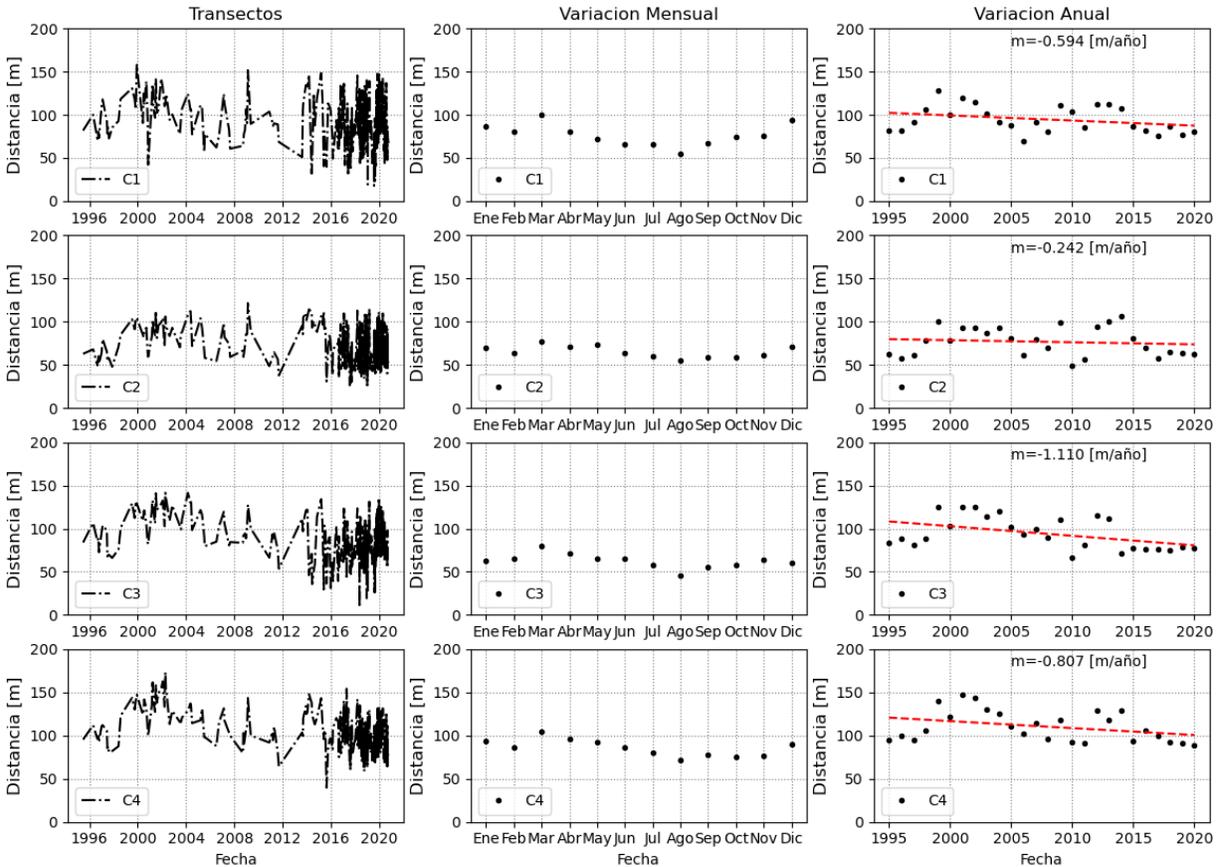


Figura 4: Análisis desde 1995-2020 de la línea de costa, variación mensual y anual.

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La aplicación de “CoastSat” ha permitido obtener una data histórica de la posición de la línea de costa en las playas de la Serena, y determinar la variación estacional en la Bahía de Coquimbo para el año 2020. La herramienta, fue contrastada mediante mediciones de terreno en distintos perfiles a lo largo de la bahía mostrando un error en promedio de ± 10 m, correspondientes a los errores de precisión documentados por la herramienta “CoastSat” (Vos et Al, 2019). Esto sugiere que errores similares podrían obtenerse al aplicar el método en otras playas de Chile, por lo que sería una buena opción para generar una base de datos detallada del estado presente de las playas nacionales.

Por otra parte se ha estudiado los rangos de la posición de la línea de costa el año 2020, determinando que para la bahía de Coquimbo existen dos marcadas estaciones, verano-otoño y invierno-primavera, con una variación de 58 m en la zona norte, 40 m en la zona centro y 35.5 m en la zona sur de la bahía.

Respecto de las playas de la Serena se pudo constatar que en los últimos 20 años han estado experimentando una erosión en el rango de 0.2 a 1.1 m/año. También una revisión más detallada ha mostrado que la tasa anual de retroceso de la línea de costa está en un leve proceso de aceleración en los últimos 5 años. Respecto de los valores presentados por (Luijendijk, A. et al., 2018) para la zona de estudio y los presente, existe una diferencia. Los valores del presente estudio muestran una tendencia a la erosión mientras que los del estudio mencionado muestran estabilidad y acreción. Lo anterior es en realidad esperable porque considera información más amplia de 1985 al 2015, mientras que el presente estudio considera desde 1995 al 2020, en donde de acuerdo a un análisis cualitativo basado en fotografías, se puede argumentar que efectivamente entre 1985 al 2005, la playa ha permanecido relativamente estable. También es importante mencionar que este trabajo considera un análisis más detallado y con respaldo de datos de campo, considerando el efecto de la marea. Como han mencionado otros autores, las discrepancias son obvias principalmente en sectores que evolucionan lentamente, digamos menos de varios metros por año, y en sitios con una gran variabilidad intra e interanual de la costa (B. Castelle, et Al., 2021).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Aguas Consultores y a la Dirección de Obras Portuarias por la información suministrada para la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

- Vos K., Splinter K.D., Harley M.D., Simmons J.A., Turner I.L. (2019). CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, volumen 122, 122.
- D.L. Civco. (1993). Artificial neural networks for land-cover classification and mapping. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 7 (1993), pp. 173-186
- F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, É. Duchesnay. (2011). Scikit-learn machine learning in Python. *J. Mach. Learn. Res.*, 12 (2011), pp. 2825-2830
- S. van der Walt, J.L. Schönberger, J. Nunez-Iglesias, F. Boulogne, J.D. Warner, N. Yager, E. Gouillart, T. Yu. (2014). Scikit-image: image processing in Python. *PeerJ*, 2 (2014), p. e453
- N. Otsu. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 20 (1979), pp. 62-66

M.P. Cipolletti, C.A. Delrieux, G.M.E. Perillo, M. Cintia Piccolo. (2012). Superresolution border segmentation and measurement in remote sensing images. *Comput. Geosci.*, 40 (2012), pp. 87-96

Codiga, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp.

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S.G.J. The State of the World's Beaches. *Sci Rep* 8, 6641 (2018).

B. Castelle, G. Masselink, T. Scott, C. Stokes, A. Konstantinou, V. Marieu, S. Bujan. (2021). Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology*. Volume 383, 107707.

Vos K., Harley M.D., Splinter K.D., Simmons J.A., Turner I.L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, Volume 150, Pages 160-174.

Campos R., Beyá J., Mena M. (2015) Cuantificación de los daños históricos a infraestructura costera por marejadas en las costas de Chile. *Proceedings del XXII Congreso Chileno de Hidráulica*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica

Winckler P., Contreras M., Beyá J., Molina M. (2015) El temporal del 8 de agosto de 2015 en la bahía de Valparaíso. *Proceedings del XXII Congreso Chileno de Hidráulica*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

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. (2019) Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile, Santiago, Chile. Ministerio del Medio Ambiente.