

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAMBIOS HISTÓRICOS DE LA LÍNEA LITORAL EN BAHÍAS CHILENAS: ORIENTACIONES AL MANEJO COSTERO

Carolina Martínez ¹

RESUMEN

La costa chilena es un lugar ideal para analizar la evolución de la línea litoral a través de modelos de ajuste, dado que una característica principal es la configuración de sistemas de bahías y grandes ensenadas, la mayoría fuertemente urbanizadas. Con el propósito de establecer los tipos de cambios que afectan el litoral arenoso en Chile y compararlas con escenarios de cambio que actualmente se reportan para el hemisferio norte, se analizan las variaciones espacio-temporales de la línea litoral para diferentes bahías y playas de ensenadas de Chile central, por medio de modelos de ajuste y superposición cartográfica. Estos modelos se aplicaron a una base de datos histórica de fotografías aéreas que cubren el período 1945 a la fecha, complementada con levantamientos topográficos.

Para bahías de la Región de Valparaíso (36°S), se obtuvo para la sección sur de la bahía de Concón, una tasa media de 0,58 m/año y para la sección norte 0,43 m/año. Para la bahía de Algarrobo se obtuvo 0,63 m/año y para la playa de bolsillo de Tunquén 0,45 m/año. Estos datos se comparan con resultados recientes para bahías de la región del Biobío (36°S) y se interpretan los factores físico-naturales que inducen los cambios.

Palabras claves: línea litoral; modelos de ajuste; superposición cartográfica.

¹Dra. Carolina Martínez. Depto. de Geografía. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía. Universidad de Concepción. Víctor Lamas N° 1290, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile. Casilla 160-C. E-mail: carolmartinez@udec.cl

I. Introducción

La determinación cuantitativa de las variaciones espacio-temporales que experimenta la línea litoral en una región, es fundamental para interpretar los tipos de cambio que afectan la costa. Estos cambios se asocian a diferentes factores naturales y antrópicos que causan variaciones en el abastecimiento sedimentario y en la hidrodinámica del medio marino. Desde hace algunas décadas, se han desarrollado aproximaciones numéricas y modelos de ajuste con funciones logarítmicas y parabólicas para determinar cambios de la línea litoral, lo cual ha permitido establecer principalmente si la costa se encuentra afectada por procesos erosivos o de acumulación para escalas temporales pre-establecidas.

Con el propósito de analizar los tipos de cambio que afectan a la costa chilena, se aplicaron modelos de ajuste y métodos de superposición cartográfica a la línea litoral a tres bahías típicas de Chile central (33°S a 37°S) caracterizadas por mar de fondo (swell), régimen micromareal y condiciones de margen continental activo donde se desarrolla una tectónica diferencial de bloques relevante. Estos resultados se esperan sean incorporados al manejo costero a través de microzonificaciones que consideren el funcionamiento natural de la costa en relación los usos asignados.

II. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

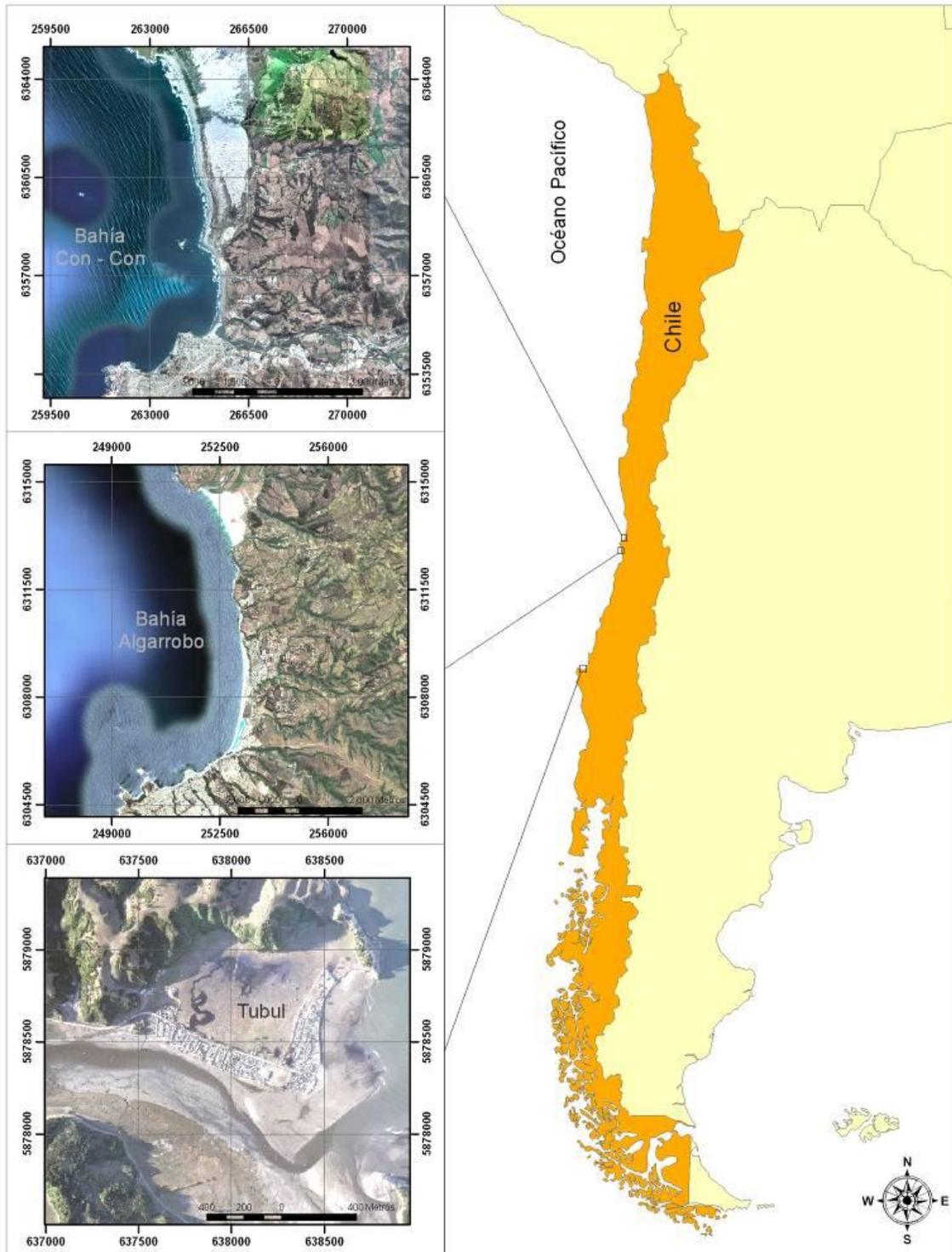
Para la determinación de los cambios de la línea litoral, se consideraron tres bahías de diferentes dimensiones localizadas en Chile centro-sur: Concón, Algarrobo y Tubul-Raqui, las dos primeras localizadas en la Región de Valparaíso (33°S) y la tercera ubicada en la Región del Bio-Bío (37°S) (Figura N° 1). La costa se caracteriza por una tectónica diferencial de bloques que ha influido el desarrollo de grandes ensenadas y bahías. Las direcciones más importantes del oleaje y de mayor incidencia son W, SW y NW (SHOA, 1994). El régimen de marea es mixto con tendencia semidiurna y de tipo micromareal.

1.1 Procedimientos

Se construyó una base de datos histórica a través de fotografías aéreas correspondientes a las bahías seleccionadas, las cuales fueron georreferenciadas y llevadas a datum WGS-84. El período de tiempo considerado en la base histórica comprende desde 1945 a 2010. Para actualizar esta base de datos se realizaron levantamientos topográficos vinculados de vértices conocidos en las siguientes fechas: abril de 2001, abril de 2004 y septiembre de 2008 para la bahía de Concón y agosto de 2010 en la bahía de Tubul-Raqui. La metodología general para la cuantificación de los cambios de la línea litoral en bahías y ensenadas se obtuvo de la propuesta de Martínez et al., (2009).

La superposición cartográfica se aplicó a la sección norte de la bahía de Concón y a la bahía de Tubul-Raqui donde se utilizó un criterio de medición sistemático con intervalos de 100 m a través de lo cual se establecieron estados de retroceso, estabilidad o avance de la línea litoral. Debido a su forma, la bahía de Algarrobo y la sección sur de la bahía de Concón posibilitaron la aplicación del ajuste logarítmico a través del modelo clásico de Yasso (1965).

Figura 1. Área de estudio



Adicionalmente, para la bahía de Concón se aplicaron las funciones logarítmica y parabólica incluidas en el software SMC (Sistema de Modelamiento Costero) desarrollado por la Universidad de Cantabria (Medina et al., 2001), lo cual permitió comparar los resultados con el modelo de Yasso (1965).

La función logarítmica aplica la ecuación polar de una espiral de forma: $R = a * \exp(\Phi * \cotg * b)$ donde: los valores a y $\cotg b$ son constantes, siendo el radio polar del punto de origen o referencia de la espiral y el parámetro característico, y Φ es el ángulo del azimut polar que varía entre 0 y 360°. Se probaron una serie de valores aplicables a cada una de las constantes (a y b) y tomando valores para el ángulo Φ . Finalmente se determinaron dos valores (a y b) que establecieron el mejor ajuste a la línea litoral del área de estudio a partir de puntos de control. Estos últimos permiten determinar el radio inicial de la espiral (R_0) mediante una aproximación geométrica del ángulo de incidencia del oleaje. La función parabólica del SMC aplica la parábola de Hsu & Evans (1989).

II. Resultados

En la sección sur de la bahía de Concón, la tendencia al retroceso se concentra únicamente en la zona proximal con valores extraordinarios cercanos a -400m (año 1977), mientras que el estado estable predomina en el resto del área (Tabla N°1). Las tasas de acreción son mínimas durante el período, sobresaliendo únicamente el año 1977 con +83,7m en la zona distal, siendo el promedio para la serie de +21,6m. Si se compara con el estado de retroceso, los valores máximos fluctúan entre -226m y -368,6m registrados en el sector de las flechas litorales del estuario Aconcagua (zona proximal) y corresponden a los años 1977 y 1980. El promedio para el estado de retrogradación en la serie histórica es de -150,5m. Considerando el comportamiento histórico de la línea litoral, se obtiene un valor medio de -37m, indicando un estado estable con leve tendencia hacia el estado erosivo.

En la sección norte de la bahía, escasos cambios en la línea litoral, los cuales no excedieron de +71 m para el estado de acreción y de -37 m para el de retrogradación durante el período 2008-1954. La variación promedio de la línea litoral para la serie histórica es de 14,3 m (Tabla N°2).

Tabla N° 1. Variaciones de la línea litoral, sección sur de la bahía de Concón

Año	Avance (m)	Posición	Retroceso (m)	Posición
1945 (s/f)	+39,0	Proximal	-80,21	Media
1954 (diciembre)	+3,96	Proximal	-73,31	Media
1970 (septiembre)	-	-	-132,67	Proximal
1972 (marzo)	+32,94	Distal	-73,15	Proximal
1975 (febrero)	+2,0	Distal	-142,43	Proximal
1977 (octubre)	+83,77	Distal	-368,65	Proximal
1980 (junio)	0	Distal	-226,02	Proximal
1993	+13,22	Distal	-208,77	Proximal
1994 (octubre)	+36,77	Proximal	-53,0	Proximal
2001	0	Proximal	-123,75	Proximal
2004 (febrero)	-	-	-191,0	Proximal
2005	+40,41	Proximal	-117,9	Proximal
2008 (septiembre)	+5,3	Distal	-166,0	Proximal
Promedio:	+21,6	Promedio:	-150,5	
Promedio Serie (1945-2008):	-37,0 m			

Tabla N° 2. Variaciones de la línea litoral, sección norte de la bahía de Concón

Año	Avance (m)	Posición	Retroceso (m)	Posición
2008-1954	+41,9	Proximal	0	-
2008-2004	+71,1	Proximal	-16,4	Proximal
2004-1954	+40,0	Proximal	-37,0	Proximal
Promedio:	+51,0	Promedio:	-26,7	
Promedio Serie (2008-1954):	14,3 m			

Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en Bahías Chilenas: Orientaciones al manejo costero.

Carolina Martínez

El comportamiento espacial de la línea litoral de la bahía de Concón se indica en las Figuras N° 2, 3 y 4. En la sección sur, se presenta estabilidad a partir de 1 km del área de influencia del estuario del río Aconcagua (Figura N° 2 A y N° 3).

Figura N° 2. Variaciones en la posición relativa de la línea litoral sección sur (a) y norte (b) de la bahía de Concón

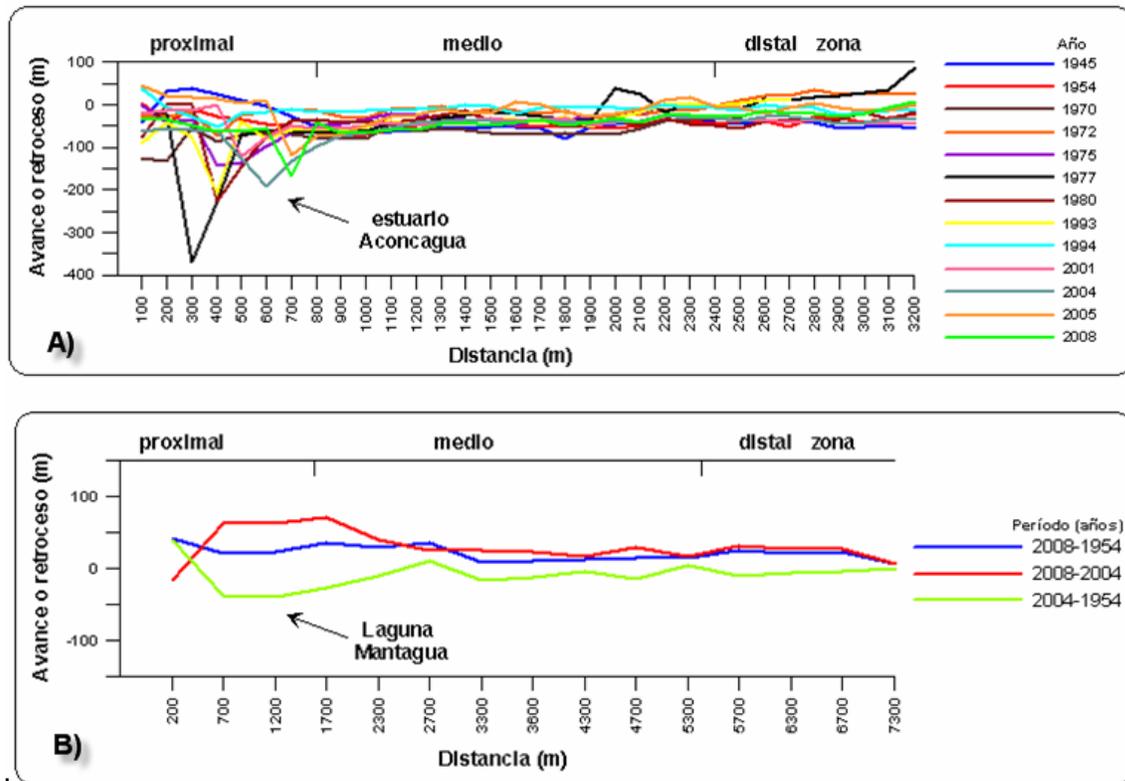


Figura N° 3. Variaciones espacio-temporales en la posición relativa de la línea litoral sección sur de la bahía de Concón

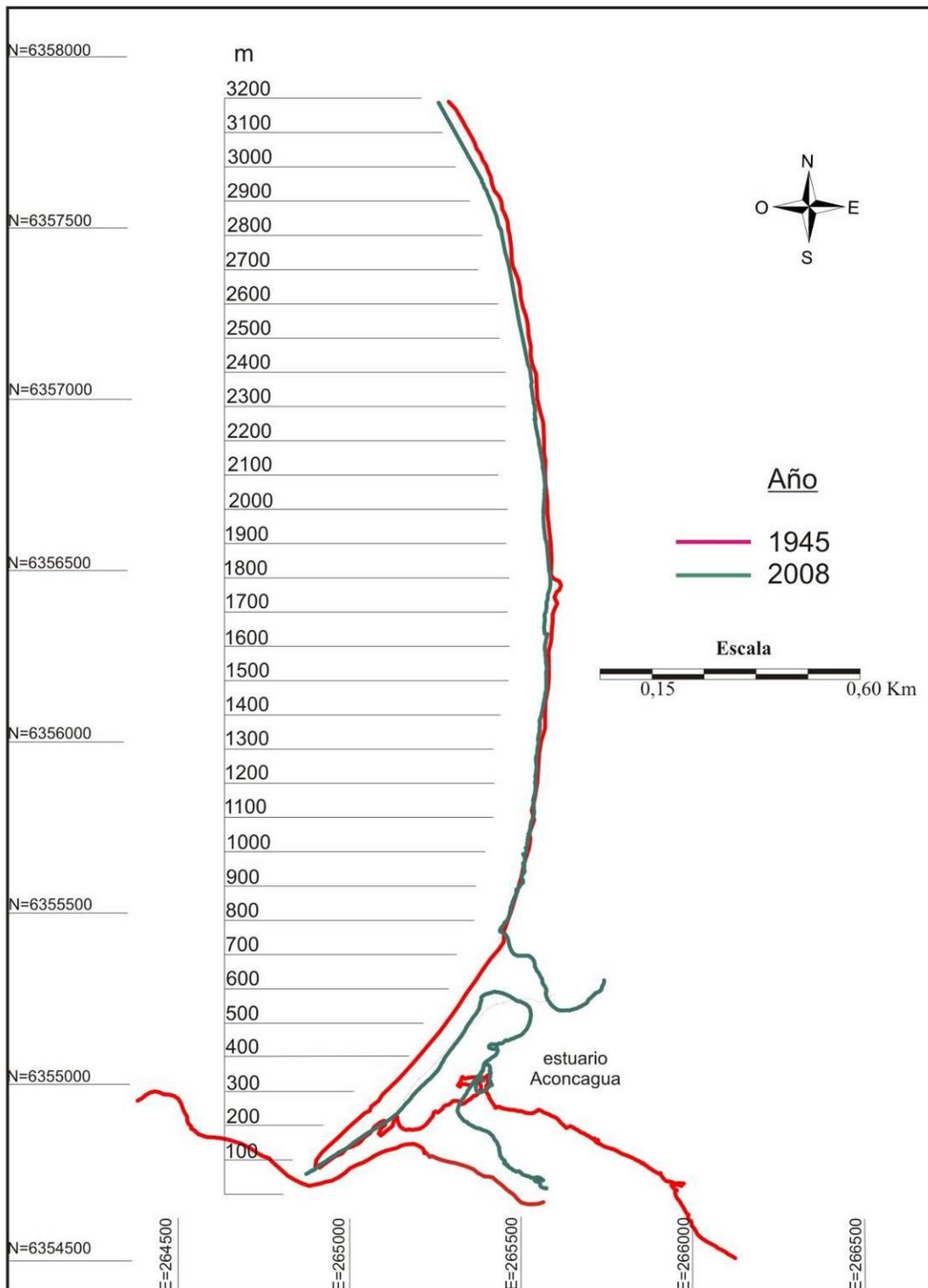
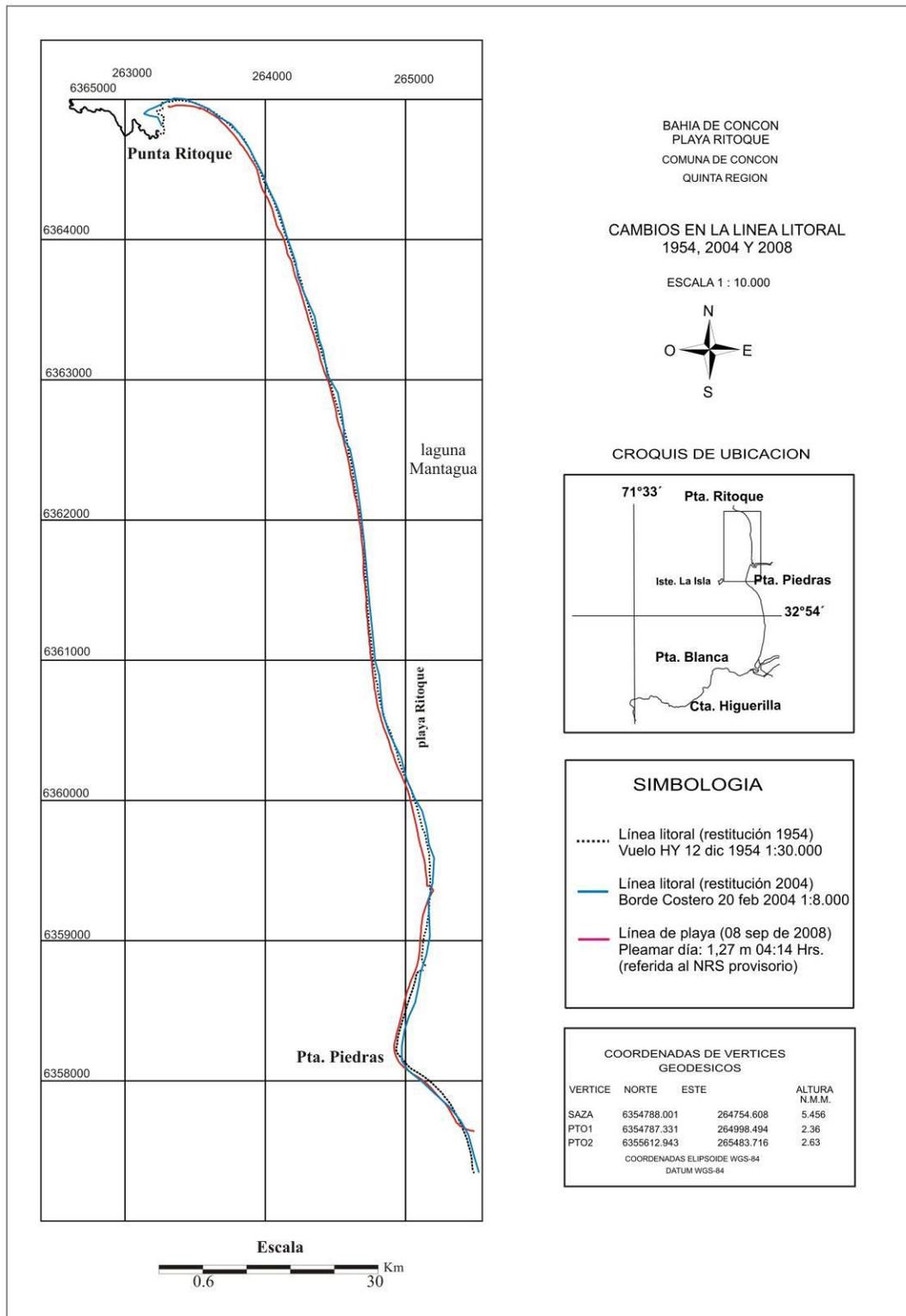


Figura N°4. Variaciones espacio-temporales en la posición relativa de la línea litoral sección norte de la bahía de Concón

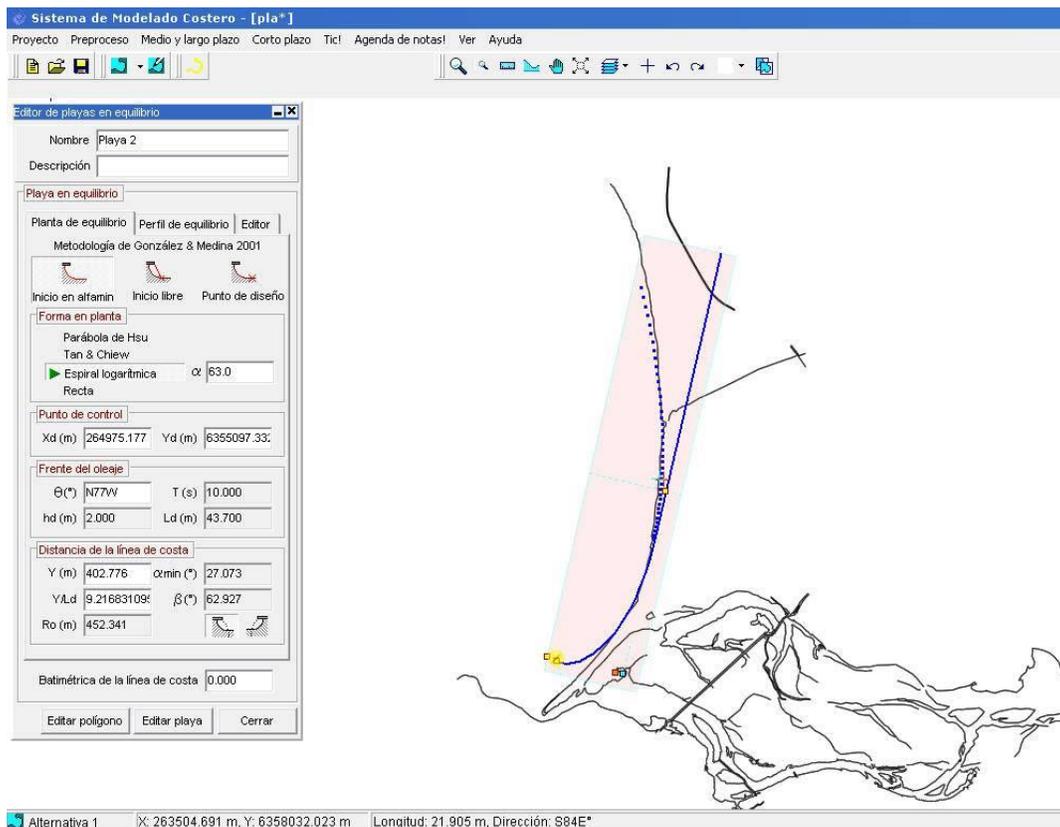


Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en Bahías Chilenas: Orientaciones al manejo costero.

Carolina Martínez

Para el ajuste logarítmico con el SMC en la sección sur de la bahía de Concón, se obtuvieron diferentes resultados, ya que para los años 1945 y 1954 se representó de manera adecuada la línea litoral en la zona proximal y sector rectilíneo, perdiendo su grado de ajuste en la zona distal (Figura N°5). Esta situación se acentuó para las otras líneas litorales analizadas donde se observó que las zonas con mejor ajuste se registraron en pequeños tramos de la costa, mientras que en otros tramos este se perdió, especialmente para los años 1977, 1980 y 1996 donde se registra desajuste en la zona media quedando la curva del modelo detrás de la línea litoral del año respectivo.

Figura N°5. Ajuste logarítmico año 1945 mediante SMC, sección sur de la bahía de Concón

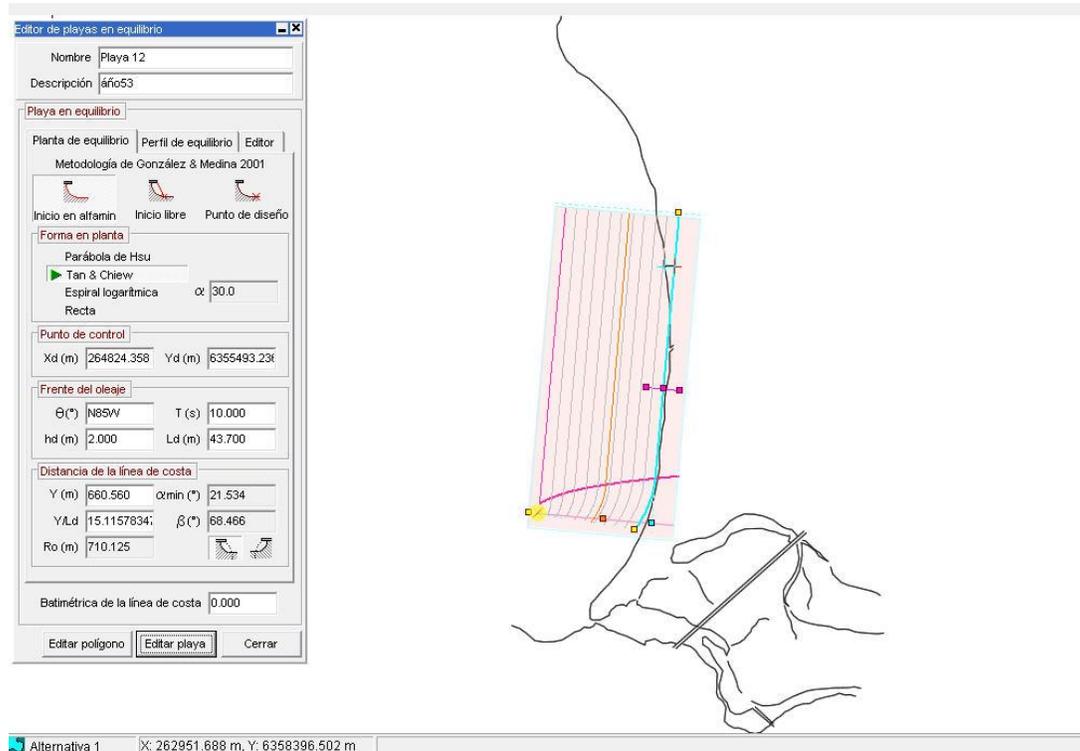


Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en Bahías Chilenas: Orientaciones al manejo costero.

Carolina Martínez

Para el ajuste parabólico SMC, todos los experimentos consideraron luego de la definición de los puntos de control comunes, un ángulo de rotación de la espiral α de 30° . Las condiciones de oleaje incluyeron un período de ola (T_s) de 10 s y una longitud de onda de (L_d) de 43 m y frente de ola de componente $N85^\circ W$ (θ). Solo para el año 2004, las condiciones fueron $\theta=N78^\circ W$, $T=12$ s y $L_d=197$ m para el mismo valor de α . De acuerdo con esto, para el año 1954 en donde se aplicó la variante de Tan & Chiew (1994), se obtuvo un ajuste adecuado en el sector medio de la bahía en donde hubo coincidencia entre la línea litoral del año y la parábola (Figura N° 6). Para el año 1980 se aplicó el ajuste parabólico de Hsu & Evans (1989) estableciéndose igual resultado.

Figura N° 6. Ajuste parabólico año 1954 a través de SMC, sección sur de la bahía de Concón



Para la bahía de Algarrobo, aplicando el modelo clásico de Yasso (1965), los cambios principales se registran en la zona proximal para el estado de progradación con valores extremos de +130 m y +139 m correspondientes a los años 1980 y 1996. Valores representativos del estado de retrogradación son poco significativos, registrándose

Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en Bahías Chilenas: Orientaciones al manejo costero.

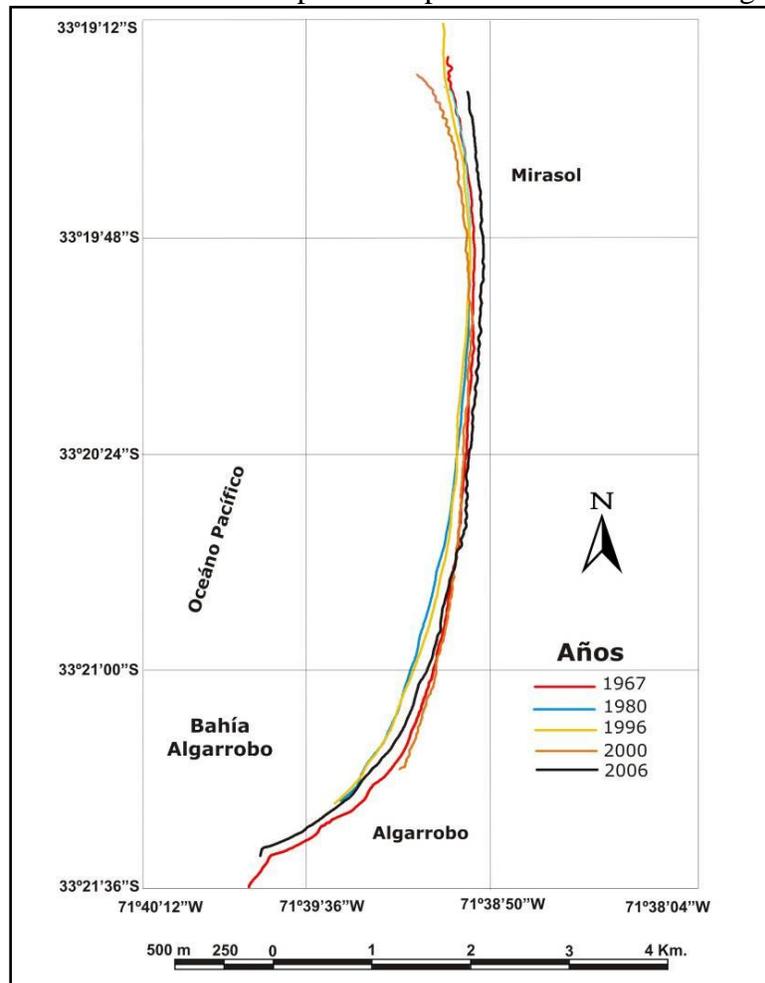
Carolina Martínez

únicamente el valor de -73 m en relación al año 2006 para la zona distal de la bahía (Tabla N° 3 y Figura N° 7).

Tabla N° 3. Variaciones de la línea litoral, sección norte de la bahía de Concón

Año	Avance	Posición	Retroceso	Posición
1980	130,89	Proximal	-11,53	Distal
1996	139,89	Proximal	-	-
2000	96,93	Distal	-28,03	Proximal
2006	71,67	Proximal	-73,33	Distal
Promedio serie		+25,52 m		

Figura N° 7. Variaciones espacio-temporales en la bahía de Algarrobo



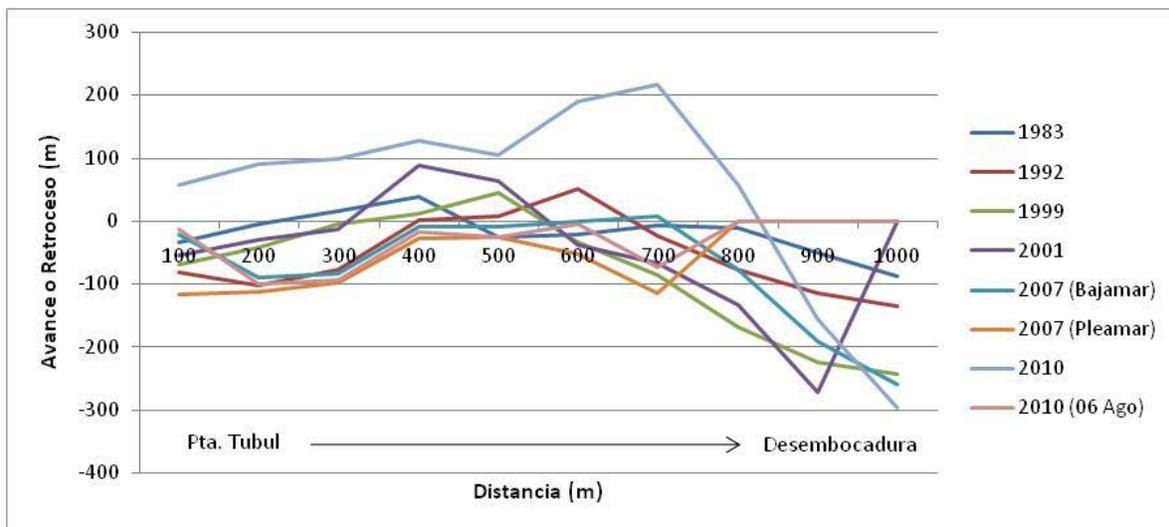
Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en Bahías Chilenas: Orientaciones al manejo costero.

Carolina Martínez

Para la bahía de Tubul-Raqui, se determinó para el período 1979-2010 una variación promedio de la línea litoral de -39,15m y una tasa promedio anual de 1,2m. Todos los períodos de años comparados, a excepción del período 1979-2010, registraron tendencia al retroceso con una variación promedio máxima de -80m (Figura N°8). En el período 1979-2010, la línea litoral registró un promedio de 48,45m donde se produjo una acreción importante como resultado del alzamiento costero provocado por el terremoto del 27/F donde la costa del Golfo de Arauco ascendió 2m.

El terremoto Mw=8.8 y el posterior tsunami ocurrido el 27 de febrero de 2010 modificaron violentamente la geomorfología del sector y de la costa chilena en general provocando en el área un alzamiento costero de 1,4 y de hasta 2m en áreas vecinas (Lebu) (Quezada et al., 2010). Entre los principales efectos morfológicos está la emersión de un sector de la plataforma de abrasión y la creación de una playa de 100 m de extensión (Figuras N°9 y 10).

Figura N° 8. Variaciones espacio-temporales en la bahía de Tubul-Raqui



Análisis comparativo de cambios históricos de la línea litoral en Bahías Chilenas: Orientaciones al manejo costero.

Carolina Martínez

Figura N° 9. Cambios espacio-temporales en la bahía de Tubul-Raqui (1979-2010)

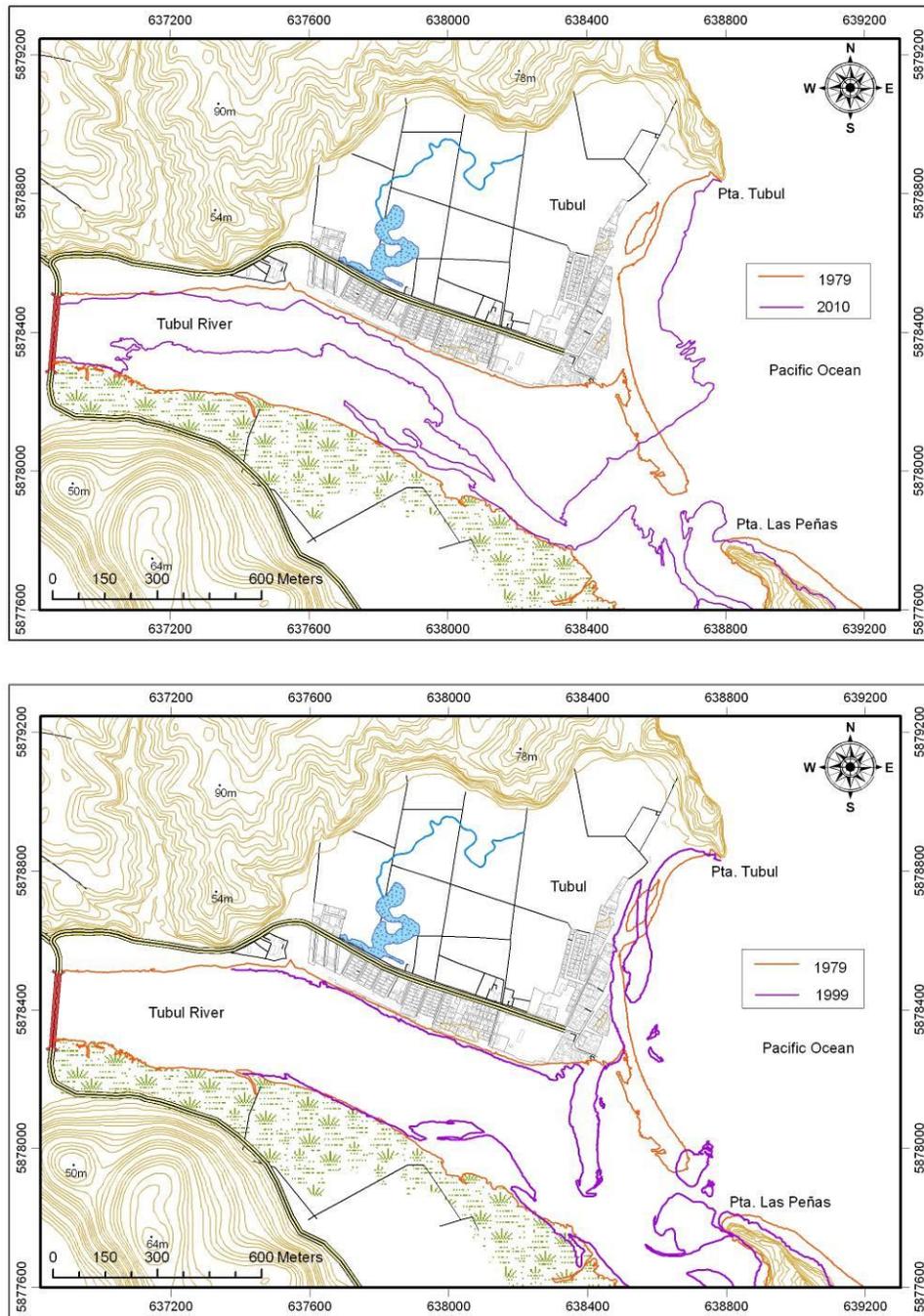
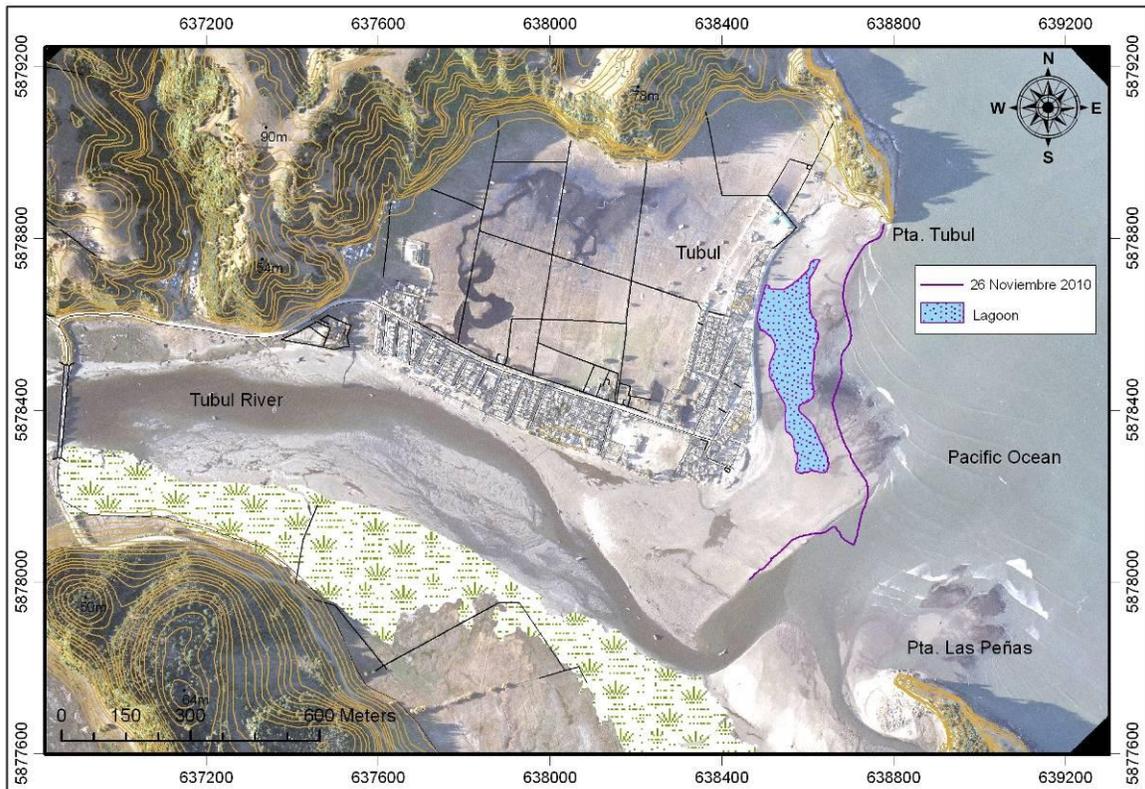


Figura N° 10. Cambios morfológicos en la costa de la bahía de Tubul-Raqui provocados por el terremoto Mw=8,8 del 27/F de 2010 en Chile



III. Conclusiones

Se obtuvo para la sección sur de la bahía de Concón, una tasa media de 0,58 m/año y para la sección norte 0,43 m/año. Para la bahía de Algarrobo se obtuvo una tasa media de 0,63 m/año y para la playa de bolsillo de Tunquén 0,45 m/año. Para la bahía de Tubul-Raqui se obtuvo una tasa media anual de 1,2 m/año.

A pesar de las tendencias mundiales, la costa de Chile central se encuentra en estado estable para escalas temporales de 40 a 60 años.

Los factores naturales que generan cambios drásticos en la posición relativa de la línea litoral se asocian a los terremotos de subducción y a los eventos de tsunamis asociados.

IV. Referencias

- Hsu, J. & C. Evans. 1989. Parabolic bay shapes and applications. *Proc. Institution of Civil Engineers*, 87: 557-570.
- Martínez, C.; Jaque, E.; Quezada, M.; Quezada, J. & A. Fernández. 2009. Aplicaciones de modelos de ajuste para el análisis de los cambios históricos de la línea litoral en grandes ensenadas. Ejemplos en Chile. En: Alcántara-Carrió, J.; Correa, I.; Isla, F.; Alvarado, M.; Klein, A.; Cabrera, J. & R. Barlow Eds. "Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral, 325 pp.
- Medina, R.; Vidal, C.; González, M.; Bernabeu, A. & J. Galofré. 2001. Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de "Equilibrio". *Física de la Tierra*, 13: 95-117.
- Quezada, J.; Jaque, E.; Belmonte, A.; Fernández, A.; Vásquez, D. y C. Martínez. 2010. Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw=8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*, vol. 1 N° 2, pp. 11-45.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Anuario Hidrográfico de la Marina de Chile. Valparaíso, 1994, N° 46, p. 23-34.
- Tan, S. & Y. Chiew. 1994. Analysis of bayed beaches in static equilibrium. *J. of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120(2): 145-153.
- Yasso, W. 1965. Plan geometry of hedland-bay beaches. *Journal of Geology* 73: 702-714.