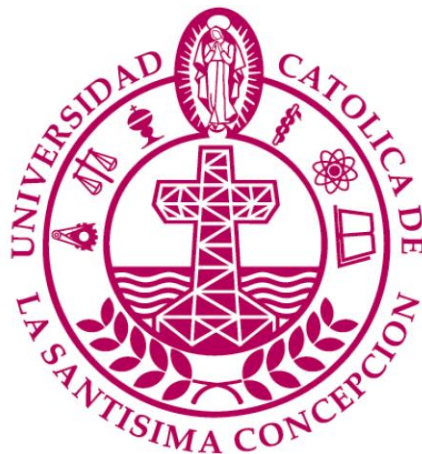


UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE SEGUIMIENTO DE LA LÍNEA DE COSTA EN LA
DESEMBOCADURA DEL RIO MATAQUITO

LORENA IVONNE ANDREA CEA FUENZALIDA

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

MEng. Mauricio Villagrán V.

Profesor Informante

Dr. Rafael Aránguiz M.

Concepción, Diciembre 2016

Resumen

La zona costera o litoral, es la zona de transición e interacción entre el ambiente terrestre y el ambiente marino. En esta zona operan los procesos costeros y tienen una gran influencia. En la actualidad la mayor parte de la población del planeta se concentra en el área costera, donde se desarrollan actividades como pesca, industrias, puertos, actividades agropecuarias y turismo, debido a esto, el estudio de la variación de la línea de costa resulta ser un problema global y de gran importancia. Por lo menos el 70% de las playas arenosas del planeta están sufriendo el proceso de variación de la línea de costa hacia la erosión (Bird, 1985).

En nuestro país este fenómeno erosivo es poco conocido debido a la carencia de estudios científicos en esta área que expliquen el dinamismo de la línea de costa, así como también conocer los agentes dinamizadores de ella y sus límites de acción, sus consecuencias directas e indirectas tanto en las poblaciones y actividades antrópicas han llevado a una mala práctica de generalización del litoral costero, y en consecuencia pérdidas económicas y humanas.

Es así que en la siguiente investigación se buscó conocer las dinámicas y los cambios en la línea de costa, a través de un modelo de seguimiento de línea propuesto por Davidson (2013), el cual fue aplicado para monitorear la variación a corto plazo de la desembocadura del río Mataquito, Región del Maule, para los meses de agosto y septiembre del año 2013. Se obtuvo una caracterización de la línea de costa con buenos resultados, concluyéndose que la metodología, aunque está desarrollada para escalas de tiempo a largo plazo, fue posible de aplicar en escalas temporales bastante menores. Los resultados muestran que el modelo es capaz de estimar razonablemente la variación de la línea de costa, generada por las forzantes principales y captar el comportamiento tendencial de la variación además de cambios bruscos ocasionados por tormentas.

El cambio entre erosión/acreción que muestran los resultados evidencia el gran dinamismo de la línea de costa ante los cambios en el clima de oleaje, lo que permite cuantificar el impacto morfológico del oleaje sobre sectores costeros.

Abstract

The coastal zone or coastline, is the transition zone and interaction between the Earth's atmosphere and the marine environment. In this area, they operate coastal processes and have a great influence. Today most of the world's population is concentrated in the coastal area, where activities such as fishing, industries, ports, farming and tourism are developed, because of this, the study of the variation of the coastline turns out to be a global and important problem. At least 70% of the sandy beaches on the planet are undergoing the process of change of coastline to erosion (Bird, 1985).

In our country, this erosive phenomenon is little known due to lack of scientific studies in this area to explain the dynamics of the coastline, as well as meet the dynamic agents of it and limits of action, its direct consequences and indirect both in populations and human activities they have led to a widespread malpractice coastline, and consequently economic and human losses.

Thus, in the following research long-term goal was to understand the dynamics and changes in the coastline, through a model line track proposed by Davidson (2013), which was applied to monitor the change in the mouth of Mataquito river Maule Region, for the months of August and September 2013. A characterization of the waterfront with good results was obtained, it concluded that the methodology, but is developed for time scales long term, was quite possible to apply in smaller time scales. The results show that the model can reasonably estimate the variation of the coastline, generated by major forcings and capture the trend behavior of variation plus sudden changes caused by storms.

The change between erosion / accretion showing results shows the great dynamism of the coastline to changes in wave climate, which quantifies the morphological impact of waves on coastal areas.

A mi familia

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mi madre Lorena Fuenzalida y mi padre Patricio Cea, por su incondicional apoyo a lo largo de toda esta etapa, ya que sin su comprensión y amor nada de lo que soy hoy sería posible, a mi hermana Josefa que por su alegría y energía es el motor de nuestra familia.

Al profesor Mauricio Villagrán por su guía, asesoría y confianza en el desarrollo de este tema, gracias por la oportunidad de desarrollar esta investigación.

A los profesores del departamento de Ingeniería Civil que han contribuido con sus conocimientos a mi proceso de formación profesional.

A Sergio, quién me acompaña en los buenos y malos momentos, gracias por tu cariño, paciencia y por cederme tu tiempo. Gracias a Matías y Maximiliano por su ayuda. A mis amigos y compañeros de carrera (Jennifer, Natacha, Eduardo, Felipe, Nicolás) por su amistad y los buenos momentos a lo largo de la vida universitaria.

Índice de contenidos

Capítulo I. Introducción	1
1. Introducción	1
Motivación	3
1.1. Objetivos.....	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
2. Capítulo II. Marco teórico.....	5
2.1. La zona costera: una interfase dinámica	5
2.1.1. El perfil de las playas	7
2.1.2. Procesos litorales.....	8
2.1.3. Erosión y acreción costera	10
2.1.4. Estado morfodinámico modal de la playa	13
2.2. Modelo de seguimiento para la línea de costa	16
2.3. Expectativas del modelo y limitaciones	20
2.4. Cálculo del error.....	21
3. Capítulo III. Implementación modelo ShoreFor	23
3.1. Área de estudio.....	23
3.1.1. Climatología y precipitaciones.....	25
3.2. Levantamiento de información de campo	27
3.3. Transectos	27
3.3.1. Extracción de datos para calibración.....	29
3.4. Procesamiento de los datos	32
3.5. Resumen de la metodología aplicada.....	34
4. Capítulo IV. Resultados	37
4.1. Resultados transectos	37
4.2. Estimación de la condición de equilibrio inicial (Ω_{eq}).....	39
4.3. Resultado parámetro de erosión, r	40
4.4. Calibración de parámetros.....	42
4.4.1. Análisis diario	42
4.4.2. Análisis semanal.....	47

4.4.3. Análisis Bi-semanal	51
4.5. Predicción del modelo.....	56
4.5.1. Predicción diaria.....	56
4.5.2. Predicción semanal.....	57
4.5.3. Predicción bi-semanal	58
5. Capítulo V. Discusión y conclusiones	60
5.1. Discusión	60
5.2. Conclusiones	66
6. Capítulo VI. Referencias.....	69
7. Capítulo VII. Anexos	77
7.1. Anexo 1: Terminología.....	77
7.2. Anexo 2	79
7.3. Anexo 3	80
7.4. Anexo 4	80
7.5. Anexo 5	81
7.6. Anexo 6.....	81

Índice de figuras

Figura 2.1: Ejemplo de perfil de playa, SOMETCUBA, 1998.	7
Figura 2.2: Zonas y elementos del perfil de playa, Ramos, 2013.	8
Figura 2.3: Escalas temporales de los cambios morfológicos en playas. Regeneración de playas, 2000.....	10
Figura 2.4: Depositación y Erosión en las playas debido a la acción de la refracción de las olas. Tarbuck & Lutgens, 2009.....	12
Figura 2.5: Comportamiento de la costa asociado con el transporte litoral. Adaptado de Hattersley & Foster, 1968.	12
Figura 2.6: Estados morfodinámicos de playas con marea. Extraído Regeneración de Playas, 2000.....	15
Figura 2.7: Interpretación del coeficiente de correlación R.	21
Figura 3.1: Área de estudio del río Mataquito ubicación general, que muestra la dirección litoral y Norte, y una porción de playa de arena. Extraído y adaptado de google earth.	25
Figura 3.2: Curva de Variación Estacional Rio Mataquito en Licanten. Extraído Cuenca Río Mataquito, 2004	26
Figura 3.3: Imagen de cámara de video vigilancia ubicada en la cima de la colina que rodea la boca del río Mataquito.....	29
Figura 3.4: Imagen rectificada	30
Figura 3.5: Promedio de imágenes proporcionadas por el sistema video costero de supervisión (paneles de la derecha) y las imágenes rectificadas en comparación con pistas DGPS (puntos verdes) y el estudio en el lugar donde barras verticales fueron desplegados en la “beach face” (puntos rojos). Extraído de Cienfuegos et al. 2014.	31
Figura 3.6: Tiempo v/s Transectos. Evolución de la Playa en la zona de estudio desde 15/08/2013-12/10/2013 medida a través de los transectos.	32
Figura 4.1: Variación línea de costa en metros para análisis diario.....	37
Figura 4.2: Variación línea de costa en metros para análisis semanal.	38
Figura 4.3: Variación línea de costa en metros para análisis bi-semanal.....	38
Figura 4.4: Resultados parámetro de erosión para análisis diario, semanal y bi-semanal.	41

Figura 4.5: Resultado variación línea de costa, Transecto 6, análisis diario, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013	44
Figura 4.6: Resultado variación línea de costa, Transecto 2, análisis diario, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013	46
Figura 4.7: Resultado variación línea de costa, Transecto 6, análisis semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013	48
Figura 4.8: Resultado variación línea de costa, Transecto 2, análisis semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013	50
Figura 4.9: Resultado variación línea de costa, Transecto 6, análisis bi-semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013	52
Figura 4.10: Resultado variación línea de costa, Transecto 2, análisis bi-semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013	54
Figura 4.11: Predicción del modelo para el análisis diario desde 15/08/2013-01/11/2013.	57
Figura 4.12: Predicción del modelo para análisis semanal desde 15/08/2013-05/12/2013.	58
Figura 4.13: Predicción del modelo para análisis bi-semanal desde 15/08/2013-19/012/2013.	59
Figura 5.1: Resumen de los estadísticos de los ensayos del modelo a corto plazo.....	59
Figura 5.2: Resumen de los estadísticos de los ensayos del modelo a largo plazo.....	62

Índice de tablas

Tabla 2.1: Estados Morfodinámicos de playas	14
Tabla 2.2: Resumen de evaluaciones de los métodos Brier Skills Score (BSS) y el error cuadrático medio (NMSE). Extraído de Splinter et al, 2014.	22
Tabla 4.1: Resultados de coeficientes estadístico para distintos factores de respuesta.	39
Tabla 4.2: Coeficientes y resultados del modelo transecto 6, análisis diario.....	44
Tabla 4.3: Coeficientes y resultados del modelo transecto 2, análisis diario.....	46
Tabla 4.4: Coeficientes y resultados del modelo transecto 6, análisis semanal.	48
Tabla 4.5: Coeficientes y resultados del modelo transecto 2, análisis semanal	50
Tabla 4.6: Coeficientes y resultados del modelo transecto 6, análisis bi-semanal.	52
Tabla 4.7: Coeficientes y resultados del modelo transecto 2, análisis bi-semanal	54
Tabla 4.8: Coeficientes usados para predicción del modelo caso días.	56
Tabla 4.9: Coeficientes usados para predicción del modelo análisis semanal.	57
Tabla 4.10: Coeficientes usados para predicción del modelo análisis bi-semanal.	58

Índice de anexos

Anexo 7.1: Terminología	77
Anexo 7.2: Tabla resumen de parámetros usados	79
Anexo 7.3: Resumen de estadísticos, extraídos de Splinter et al., 2014	80
Anexo 7.4: Parámetros de error, Extraídos Splinter et al., 2014.....	80
Anexo 7.5: Parámetros para inferir error, Splinter et al., 2014.....	81
Anexo 7.6: Ejemplo cálculo de error para análisis semanal	81

Capítulo I. Introducción

1. Introducción

La zona costera o litoral, es la zona de transición e interacción entre el ambiente terrestre y el ambiente marino. En esta zona operan los procesos costeros y tienen una gran influencia. En la actualidad la mayor parte de la población del planeta se concentra en el área costera, donde se desarrollan actividades como pesca, industrias, puertos, actividades agropecuarias y turismo.

La costa incluye tanto la zona de tierra emergida como la zona de aguas poco profundas en las que las olas realizan su actividad, así como las playas y acantilados costeros modelados por las olas y las dunas costeras. Debido a esto, el estudio de la variación de la línea de costa resulta ser un problema global y de gran importancia. Por lo menos el 70% de las playas arenosas del planeta están sufriendo este proceso de erosión de la línea de costa (Bird, 1985).

En nuestro país este fenómeno erosivo es poco conocido debido a la carencia de estudios científicos en esta área que expliquen el dinamismo de la línea de costa, así como también conocer los agentes dinamizadores de ella, el límite y/o demarcación tierra-agua, sus consecuencias directas e indirectas tanto en las poblaciones y actividades antrópicas han llevado a una mala práctica del conocimiento del litoral costero, y en consecuencia pérdidas económicas y humanas. En este contexto, en las playas se disipa gran parte de la energía que transmite el mar a través de sus movimientos y que es absorbida por tierra firme, por este motivo esta zona es muy dinámica y susceptible a importantes modificaciones topográficas y morfológicas (Castro y Morales, 2006).

Las playas no son elementos estáticos de la costa, una característica conocida por cualquier observador que se haya acercado a estas, es que no se mantienen fijas en una misma posición, sino que cambia su configuración, perfil y planta a lo largo del tiempo.

No es fácil determinar si un sistema litoral está afectado por procesos de erosión o no. Primero se debe conocer y entender los parámetros que condicionan el funcionamiento en cada sector y su evolución en el pasado reciente, respecto a la dinámica litoral (Bardají et al., 2009), la cual está condicionada por los vientos dominantes, el oleaje, las corrientes litorales y las mareas.

Por lo tanto, puede decirse que la línea de costa se encuentra en constante movimiento, cambiando su forma y posición en cada instante, teniendo avances y retrocesos, con transporte de sedimentos desde la zona seca a la sumergida y al revés, que pueden interpretarse como los conocidos procesos de erosión o sedimentación, de los cuales se hablará más adelante.

Debido a esto, el estudio de la variabilidad de la línea costera y su tendencia de erosión/acreción es fundamental para una amplia gama de investigaciones llevada a cabo por científicos de la costa, ingenieros costeros y gestores costeros (Boak and Turner, 2005).

Lo importante de la detección de la variabilidad de la línea de costa es conocer los mecanismos que gatillan su cambio y el papel que juegan cada una de las forzantes (oleaje, mareas, vientos, etc.) en los continuos cambios que se suceden a diferentes escalas temporales.

Es así que en la siguiente investigación se buscó conocer las dinámicas y los cambios en la línea de costa de la desembocadura del Río Mataquito durante el periodo de agosto-diciembre de 2013, con el fin de conocer cuáles son los factores que producen los cambios a nivel de escala a corto plazo.

Motivación

La franja litoral es limitada y sujeta a múltiples usos que en algunos casos son contrapuestos. Entre estos usos destacan el transporte marítimo y por consiguiente las infraestructuras portuarias, la actividad pesquera, la navegación deportiva, el turismo de masas y su principal soporte: las playas. La confluencia de estos intereses constituye una importante preocupación de las autoridades, los profesionales y de la sociedad (Antonio Lechuga Álvaro, 2002).

Las playas son uno de los elementos más dinámicos del relieve terrestre y como señalaron los pioneros en su estudio, constituyen una excelente defensa natural del territorio. Al mismo tiempo el valor ambiental, paisajístico y turístico de las playas es innegable. De lo anterior se deduce la fragilidad inherente de las mismas y la necesidad de evitar su inestabilidad y deterioro. (Antonio Lechuga Álvaro, 2002).

Es así que la motivación de estudiar la variabilidad de la línea de costa a través de un modelo de base física, se basa principalmente en el conocimiento de un lugar específico donde se ubicará el límite tierra-agua, ya que permite reducir y predecir el daño que provoca la energía del oleaje a las estructuras y/o construcciones. Por lo tanto, el conocer donde se encontrará este límite para la desembocadura del Río Mataquito es de gran importancia, ya que con estos resultados será posible obtener la variación real de la línea costera y así poder definir con exactitud hasta donde llegaría el oleaje, lo que es clave al momento de construir alguna estructura de contención.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Como objetivo general de la presente tesis es el conocer y entender la variabilidad de la línea de costa a través de un modelo de base física en la desembocadura del Río Mataquito, que pretende caracterizar el comportamiento de la costa ante cambios en el oleaje local en el corto plazo.

1.1.2. Objetivos específicos

- Conocer y entender el modelo predictivo de línea de costa propuesto por Davidson et al., 2013.
- Adaptar, calibrar y validar el modelo propuesto por Davidson et al., 2013.
- Identificar la influencia del oleaje en la variabilidad de la línea de costa a diferentes escalas temporales de corto plazo: día, semana, y dos semanas.

2. Capítulo II. Marco teórico

Este capítulo se concentra en realizar una breve introducción de lo que se considera zona litoral, forma de perfil y planta de una playa con descripción de las morfologías más habituales, y descripción de los parámetros hidrodinámicos más relevantes que se van a utilizar a lo largo del trabajo.

También se describe el modelo propuesto por Davidson et al. 2013; Splinter et al. 2014, conociendo sus ecuaciones y su metodología de aplicación.

2.1. La zona costera: una interfase dinámica

La línea de costa es la zona de interfase dinámica entre el mar y la tierra seca (arena). Se caracteriza por representar la interacción de la rompiente de las olas, el aumento o descenso de las mareas, la descarga de sedimentos de los ríos, las corrientes lejanas y cercanas, procesos biológicos, el lento cambio del nivel del mar, el ascenso o descenso de los continentes y la actividad del ser humano (Guzmán et al., 2008).

La playa, por tanto, se puede definir como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje (S.M. Ramos, 2013).

La ubicación de la línea costera a lo largo de las costas oceánicas, varía ampliamente en un espectro de escalas temporales como consecuencia de la erosión de las costas (retroceso) o acreción (avance), cambios en el nivel del agua y levantamientos o subsidencia del terreno. La posición de la línea de costa refleja el balance entre los sedimentos existentes en la costa y la energía proveniente de las diferentes forzantes que actúan sobre ella, y sus variaciones pueden indicar efectos naturales o inducidos por el hombre a lo largo de la costa o en las cuencas fluviales cercanas. La evolución del litoral costero está dada por la

interacción de las formaciones rocosas o sedimentarias que lo conforman, las estructuras que lo afectan, los agentes hidrodinámicos y los factores antrópicos (Posada y Henao, 2008).

Actualmente se encuentran en desarrollo numerosos estudios que abordan a la dinámica de la zona de rompientes de las playas (ej. C. Martínez y S. Salinas, 2009). La modelación del flujo y del transporte de sedimentos en la zona de rompientes, sólo se puede realizar imponiendo numerosas simplificaciones. Como resultado, aún en el supuesto de que las acciones sean conocidas, actualmente no existen modelos comerciales de fácil uso capaces de predecir las variaciones a corto y medio plazo en el tiempo y de pequeña y media escala en el espacio (S.M. Ramos, 2013).

La elección del modelo utilizado para predecir el cambio litoral dependerá de los procesos que rigen en el lugar y los plazos durante los cuales se requieren las predicciones. Tanto el transporte transversal de sedimentos en la costa (crosshore) como el longitudinal (longshore), determinan la respuesta costera a las condiciones cambiantes de onda. En las costas abiertas, los procesos litorales son comúnmente observados en escalas de tiempo mucho más largas (décadas) (por ejemplo, Aubrey, 1979; Clarke y Eliot, 1988; Hansen y Barnard, 2010; Ruggiero et al., 2010). La estimación de escala decenal (y más) debido a los gradientes por transporte litoral se logra más comúnmente usando 1- (o n-) modelos de la línea (por ejemplo, Pelnard-Considère, 1956; Hanson y Kraus, 1989; Ruggiero et al., 2010). En estos modelos de n-líneas, se asume un perfil de *crosshore* para mantener una forma constante y los gradientes a lo largo de la costa, se traducen en cambios de perfil en cada sección transversal. Ruggiero et al., 2010, encontró que su modelo de costa 1- línea, fue hábil en escalas de tiempo decenales, pero pobre en la escala anual, la cual se suponía dominada por los cambios en los procesos transversal (crosshore) (Splinter et al., 2014).

En el otro extremo del espectro temporal (es decir tormentas individuales), los procesos de *crosshore* tienden a dominar la respuesta de erosión y varios modelos basados en procesos tales como SBeach (Larson y Kraus, 1989) y XBeach (Roelvink et al., 2009) se han utilizado para estimar la respuesta de tormenta con un énfasis en la cuantificación de la

erosión de la playa superior y las dunas (por ejemplo, Carley et al ., 1999; McCall et al ., 2010; Splinter y Palmsten , 2012; Splinter et al., 2014). Sin embargo, la batimetría (o perfil) de datos está raramente disponible, y si lo está, es típico que son anteriores a la aparición de una tormenta específica por varias semanas o meses (incluso años), lo que puede dar lugar a una gran incertidumbre en la respuesta costera del modelo (Splinter y Palmsten, 2012) y a menudo hace necesario una ‘mejor hipótesis’ de afinación de los coeficientes del modelo y tienen una capacidad limitada para ser aplicados en otros sectores costeros (Splinter et al., 2014).

2.1.1. El perfil de las playas

El término zona costera describe el área del litoral, incluyendo las dunas costeras y la topografía del fondo hasta una profundidad tal que eventualmente se ve afectada por la acción del oleaje. Las costas arenosas son altamente dinámicas y sus rasgos morfológicos evolucionan continuamente en respuesta a las condiciones cambiantes del mar.

El perfil de la playa es la variación de la profundidad del agua h , con la distancia a la línea de costa x , en dirección normal a la misma, ver figura No.2.1. Se asume que localmente la playa presenta una batimetría recta y paralela por lo que la línea de costa puede ser representada por una curva de nivel cualquiera de la playa. Es habitual tomar el nivel medio del mar para la definición de la línea de costa, la descripción de la zona costera incluye una amplia variedad de términos, que se ilustran en la figura No. 2.2. (S.M. Ramos, 2013)

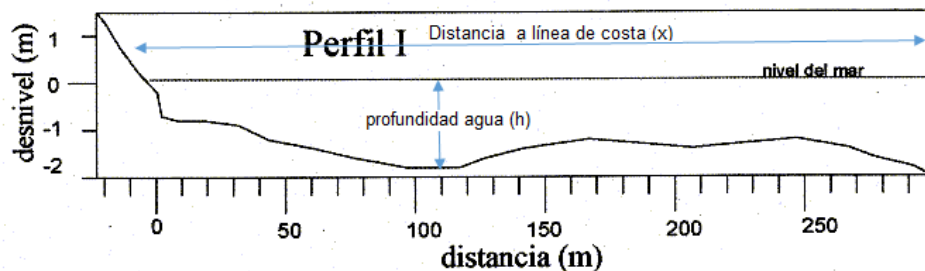


Figura 2.1: Ejemplo de perfil de playa, SOMETCUBA, 1998.

En la figura No. 2.2 se representa las diferentes zonas en las que se puede dividir el perfil de playa, siendo sus definiciones vistas en el Anexo No. 7.1.

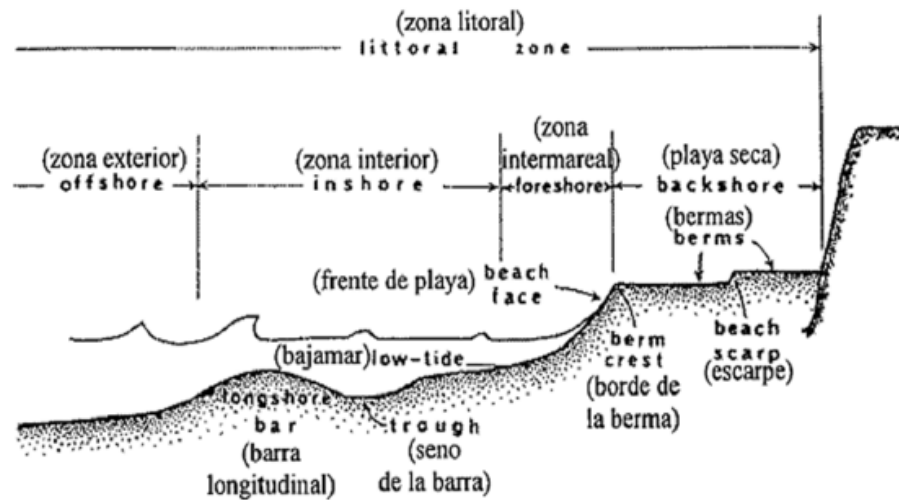


Figura 2.2: Zonas y elementos del perfil de playa, Ramos, 2013.

2.1.2. Procesos litorales

Los procesos litorales son aquellos que tienen lugar en la orilla del mar. Expresado más correctamente, en la zona de contacto entre la superficie del océano y las áreas emergidas de los continentes. La zona litoral es una faja muy estrecha, de decenas de miles de kilómetros de longitud, donde existe una gran disipación de energía. Se trata principalmente de energía atmosférica, transformada por los vientos en olas, y energía gravitatoria de la Luna y el Sol, transformada en mareas (Iriondo, 2006).

La acción de las dinámicas descritas (oleaje y mareas) en el párrafo anterior sobre los elementos del perfil de una playa produce continuamente modificaciones en la costa, dando lugar a un transporte de arena y, consecuentemente a una variación del fondo.

El perfil de la playa varía según se modifique el transporte transversal de sedimentos como resultado de la dinámica marina, especialmente debido al oleaje. Los cambios

morfológicos más notables son los asociados a los desplazamientos de las barras y al avance o retroceso de la berma. Estos procesos corresponden al conjunto de interacciones dinámicas circunscritas al área de contacto entre las grandes masas de agua y las tierras emergidas que las bordean, estas áreas son las litorales (Geología, Dinámica Litoral).

Según sea el resultado general de esas modificaciones, se forman zonas de erosión en algunos lugares y zonas de acumulación en otros. Las zonas de erosión están caracterizadas por el impacto de oleaje y la formación de acantilados. Las zonas de acumulación forman playas albúferas o lagunas litorales, cuando están sometidas a la acción predominante de las olas (Iriondo, 2006).

Si la dinámica principal está representada por las mareas, se forman estuarios y marismas, en las desembocaduras de ríos importantes, que aportan muchos sedimentos desde el interior del continente, se desarrollan deltas (Iriondo, 2006).

La ubicación de la línea costera a lo largo de las costas oceánicas, varía ampliamente en un espectro de escalas temporales como consecuencia de la erosión de las costas (retroceso) o acreción (avance), cambios en el nivel del agua y levantamientos o subsidencia del terreno (Posada y Henao, 2008).

La figura No. 2.3. muestra una escala temporal de los cambios morfológicos en playas, aquí se observa que las escalas de las diferentes dinámicas y respuestas morfológicas de las playas suelen ser clasificadas en corto, medio y largo plazo.

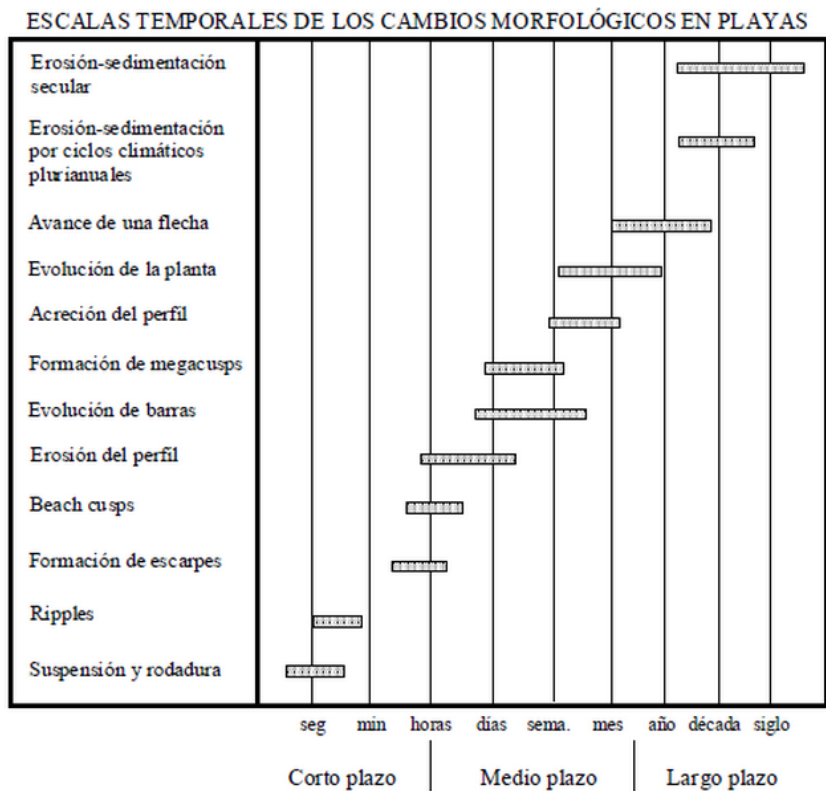


Figura 2.3: Escalas temporales de los cambios morfológicos en playas. Regeneración de playas, 2000.

2.1.3. Erosión y acreción costera

La variación de la línea de costa es un fenómeno natural que ha ocurrido durante toda la historia de la tierra, y parte de su evolución se refleja como erosión, entendida como el retroceso de la línea de costa ocasionando la destrucción de cientos de kilómetros de playa o pérdida de terrenos que albergan ecosistemas costeros o que son aptos para las actividades humanas (Posada y Henao, 2008). Dicha variación también se refleja a través de la acreción, entendida como la acumulación de arena u otro tipo de material de playa debido a la acción de las olas, las corrientes y el viento (Erosión, 2004).

Las costas pueden clasificarse o definirse de forma variada dependiendo de las características principales a tener en cuenta. Según la procedencia de los materiales que contengan:

➤ Erosión o abrasión

Que se define como la pérdida de terrenos debido a la invasión del mar, medida en un lapso de tiempo suficientemente largo que permita descartar efectos temporales o cíclicos debidos básicamente al clima. Una escala representativa en los países europeos para determinar la erosión costera en un sector, es considerar un (1) kilómetro de longitud de línea de costa y un espacio de tiempo de 10 años (Doody et al., 2005). La erosión costera es el resultado de un exceso de remoción de sedimentos respecto al aporte suministrado al área en un determinado período (Kokot, 2004). Aunque la erosión de las zonas costeras es un proceso que siempre se ha dado, parece haberse acelerado a partir de los años 70's y 80's. (Posada y Henao, 2008).

➤ Avance o Acreción

La acreción costera es definida como la acumulación de sedimentos (sedimentación) y la consolidación de terrenos por encima del nivel de las mareas, usualmente la sedimentación se consolida como espigas (ver terminología anexo No. 1) en los extremos de las islas. Gracias a la acción de la corriente litoral se consolidan nuevas tierras a partir del crecimiento de bajos formados por las corrientes mareales, entre otros (Posada et al., 2009). Los procesos de acreción son propios de las costas bajas y dan lugar al desarrollo y crecimiento de las playas y otras formas de acumulación costera (Carter, 1988).

En la figura No. 2.4, se observa una imagen de la refracción de las olas a lo largo de una línea de costa irregular. Dado que las olas tocan primero el fondo en la parte somera de los cabos, su velocidad disminuye, lo cual hace que las olas se refracten y se orienten paralelas a la línea de costa. Eso hace que la energía de las olas se concentre en los cabos (lo que provoca erosión) y se disperse en las bahías (lo que provoca la sedimentación o acreción). (Tarbuck and Lutgens, 2009).

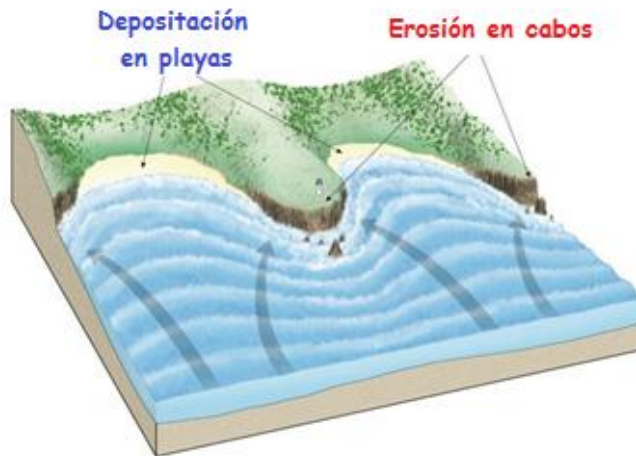


Figura 2.4: Deposición y Erosión en las playas debido a la acción de la refracción de las olas. Tarbuck & Lutgens, 2009.

Las corrientes litorales son generadas por olas que llegan a la línea costera formando un ángulo. El transporte litoral ocurre generalmente en una sola dirección, la cual se determina por observación de la configuración de la costa en vecindades de estructuras existentes, salientes y entradas de corrientes de marea. En la Figura No. 2.5 se muestran las configuraciones que deben observarse para definir la dirección del transporte litoral. (Hattersley and Foster, 1968).

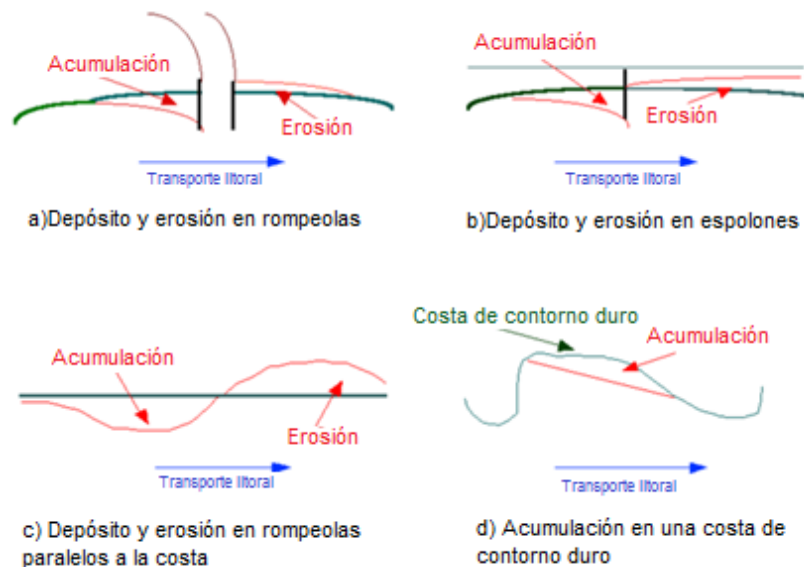


Figura 2.5: Comportamiento de la costa asociado con el transporte litoral. Adaptado de Hattersley & Foster, 1968.

2.1.4. Estado morfodinámico modal de la playa

La evolución real de un tramo costero es un proceso tridimensional en el que interaccionan morfología y dinámica, tanto en perfil como en planta.

La simplificación que supone el estudio separado de perfil y planta debe ser siempre revisada por medio de un análisis del estado morfodinámico modal de la playa que aporte información sobre el grado tridimensionalidad de los procesos, las formas de playa existentes (“*cusps*”, barras) y la hidrodinámica asociada (“*rips*”, ondas infragravitarias) aspectos de gran relevancia no solo en el cálculo de la estabilidad de la playa, sino en el diseño funcional de la misma (Regeneración de playas, 2000).

Comúnmente se suele caracterizar la variabilidad morfodinámica de una playa en el largo plazo, para lo cual no se utilizan las características del oleaje y marea en forma directa, sino más bien un estado modal de estas que corresponde a un resultado de las condiciones modales energéticas de oleaje que aborda a la playa.

La caracterización del estado modal de la playa se realizará por medio del parámetro adimensional de caída de grano Ω (Wright y Short, 1984) donde:

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \quad (1)$$

H_b = altura significante en rompiente (m)

T_p = periodo de onda peak (s)

W_s = velocidad de caída del sedimento

M = rango de marea (m)

Para playas micromareales, Wright y Short (1984), definieron tipos de playas en función del parámetro adimensional de caída de grano Ω^* , las que se muestran en la tabla No. 2.1.:

Tabla 2.1: Estados Morfodinámicos de playas

Estado Morfodinámico	$\Omega^* = \frac{H_b}{W_s T_P}$
a) Disipativa	>5,5
b) Barra longitudinal y seno	4,7
c) Barra y playa rítmicas	3,5
d) Barra transversal y corriente de retorno (rip)	3,1
e) Barra-canaleta o Terraza de bajamar	2,4
f) Reflejante	< 1,5

H_b , T_P , W_s definidos anteriormente.

2.1.4.1. Estados morfodinámicos de playas con marea

Masselink y Short (1993), completaron el modelo de Wright y Short introduciendo el efecto de la marea por medio del parámetro adimensional RTR, que mide la carrera de marea relativa a la altura de ola. Utilizando los parámetros RTR y Ω^* , definieron los siguientes estados morfodinámicos (ver figura No. 2.6):

Carrera de marea relativa:

$$RTR = \frac{MSR}{H_b} \quad (2)$$

MSR = carrera de marea

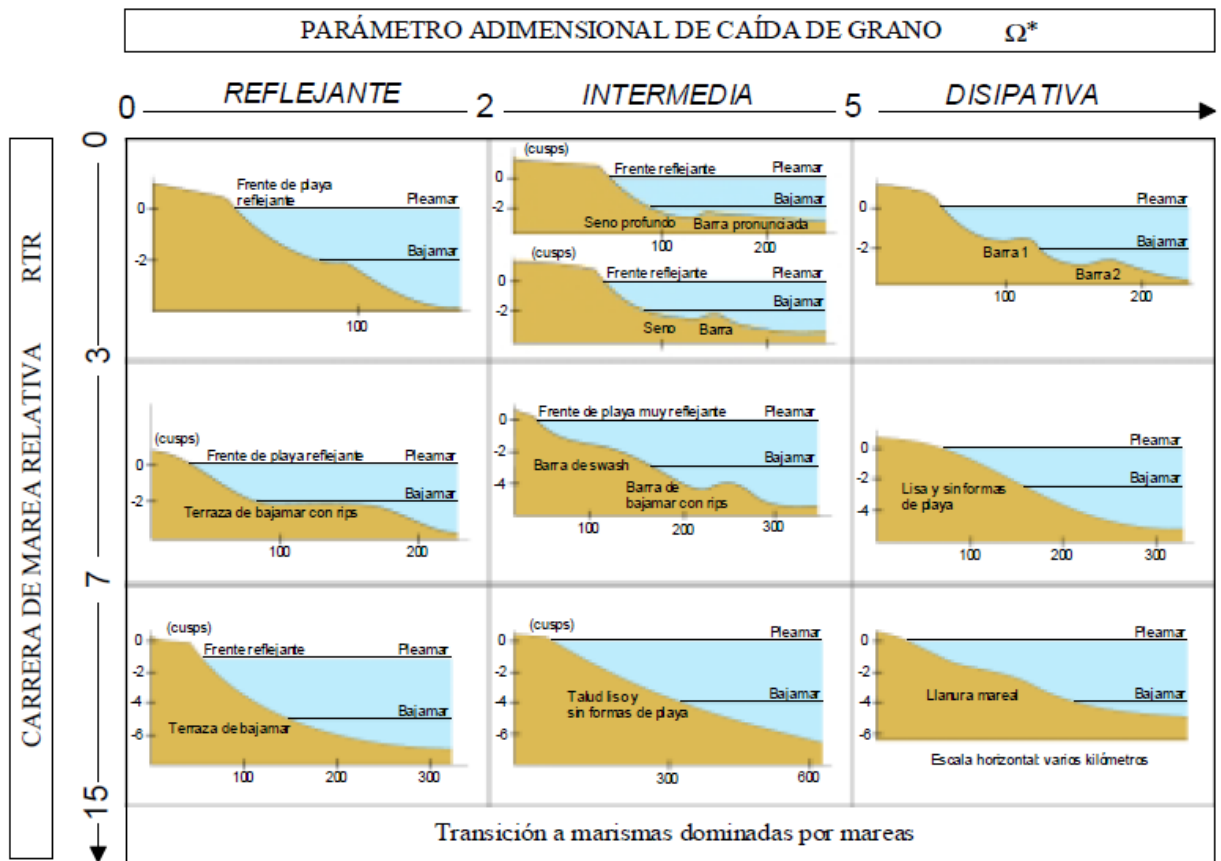


Figura 2.6: Estados morfodinámicos de playas con marea. Extraído Regeneración de Playas, 2000.

2.2. Modelo de seguimiento para la línea de costa

El modelo a investigar “A simple equilibrium model for predicting shoreline change: ShoreFor” de Davidson et al. 2013, utiliza un modelo de costa sencillo, basado en un principio de equilibrio, forzado por la altura de ola y el periodo, para conocer posibles proyecciones de cambio de costa en playas diferentes.

En este capítulo se hace una revisión y descripción del modelo de seguimiento de la línea de costa “*ShoreFor*” propuesto por Davidson et al., 2013, en el cual muestra la variación de la respuesta de equilibrio de los tipos de playa a través del parámetro adimensional de caída del Ω (ec.1) (Wright y Short (1984).

El modelo fue primero presentado por Davidson et al., 2013 y se utiliza aquí como base para explorar la aplicabilidad más general de modelo de equilibrio litoral y la comparación en el sitio de los coeficientes del modelo. *ShoreFor*, como fue llamado el modelo de Davidson et al 2013, se basa en supuesto de que las líneas costeras dominadas por los procesos transversales (crossshore), migran hacia posiciones de equilibrio variables en el tiempo (p.ej. Miller and Dean, 2004a; Davidson and Turner, 2009; Yates et al., 2009; Davidson et al., 2010).

Según *ShoreFor*, la tasa de variación litoral (dx/dt , m/s) que gobierna el modelo está dada por:

$$\frac{dx}{dt} = c(F^+ + rF^-) + b \quad (3)$$

La tasa de cambio litoral modelo (ec. 3) incluye dos coeficientes dominados por el oleaje (c , ϕ) y un término lineal (b). El primer parámetro dominado por el oleaje es el parámetro de velocidad (c ; $m^{1.5} s^{-1} W^{-0.5}$). El segundo parámetro dominado por el oleaje es el factor de respuesta (ϕ ; día) que es optimizado para el cálculo de la velocidad de caída de equilibrio adimensional (Ω_{eq} , ec, 9) que se describe a continuación. El término lineal (b ; m/s) se incluye aquí para reconocer los procesos a largo plazo no incluidos explícitamente en la

forma actual del modelo (por ejemplo, gradientes en transporte litoral, variaciones en el suministro de arena desde la costa, etc), que pueden ser capturados por un ritmo constante durante largos plazos. Cuando estos procesos no pueden ser capturados por el término lineal el modelo no resuelve la respuesta costera.

El término forzante “F” en (ec. 3) se subdivide en acreción (F+) y de erosión (F-). Este último término esta multiplicado por un coeficiente (r) (adimensional) para diferenciar las escalas de magnitud asociadas a los procesos de acreción y erosión (Miller y Dean, 2004a; Yates et al, 2009; Splinter et al., 2011^a). La tasa de erosión (r) no es un coeficiente libre en el modelo, sino que está determinada dentro de este por el balance entre las forzantes de erosión y acreción (F, (W/m)^{0.5}). De esta manera la no existencia de tendencia al considerar las forzantes, implica la no tendencia en los resultados de evolución de la línea de costa en el modelo producto de los procesos transversales a la costa (crosshore). El parámetro de erosión en (ec. 3) está dado numéricamente en el modelo como:

$$r = \frac{\left| \sum_{i=0}^N \langle F_i^+ \rangle \right|}{\left| \sum_{i=0}^N \langle F_i^- \rangle \right|} \quad (4)$$

Donde “|” indica el valor absoluto, “< >” indica una operación numérica que elimina la tendencia lineal, pero conserva el registro de la media y N es el total del registro. La tasa de variación de la línea de costa (dx/dt) depende de la magnitud del termino forzante (F), el que es función del flujo de energía P disponible para mover los sedimentos y la dirección de la respuesta de la línea de costa se basa en el desequilibrio del parámetro modal de la playa (Ω) en comparación con una condición de equilibrio definida previamente (Ω_{eq}). El término de forzante “F” se define como:

$$F = P^{0.5} \frac{\Delta\Omega}{\sigma_{\Delta\Omega}} \quad (5)$$

Donde P (Watts) es el flujo de energía del oleaje liberado en la rompiente:

$$P = EC_g \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_{s,b}^2 \quad (7)$$

E (Newton/m) es la energía de ola significativa en rompiente (suponiendo un parámetro de rompimiento, $\gamma_b = 0,78$) y $Cg = \sqrt{gh_b}$ es la velocidad de grupo en aguas poco profundas (m/s), en donde h_b (m) es la profundidad en la rompiente y se define como $h_b = H_{s,b}/\gamma_b$. Davidson et al., 2010 demostró que los términos forzantes (F) no son sensibles al exponente del flujo de energía (P) (ec. 5), por lo que parece sensato considerar una variación lineal entre la tasa de cambio de la línea de costa y la altura de oleaje, toda vez que concuerda con trabajos previos presentados por Yates et al., 2009.

El término velocidad de caída de desequilibrio adimensional ($\Delta\Omega$) en (ec. 5) está dado por:

$$\Delta\Omega = \Omega_{eq} - \Omega \quad (8)$$

y es una función de la condición de equilibrio que varía en el tiempo (Ω_{eq} , ec. 9) y la velocidad de caída adimensional instantánea (Ω , ec.1). Se debe tener en cuenta que la desviación estándar de $\Delta\Omega$ (denotado $\sigma\Delta\Omega$) se utiliza para normalizar $\Delta\Omega$ en (ec. 5), de manera que el parámetro de velocidad (c) y el flujo de energía (P) determinan la magnitud de la respuesta costera (dx/dt). El signo de $\Delta\Omega$ determina la dirección del cambio litoral (erosión o acreción) y se utiliza para F+ y F- en (ec. 3) y (ec. 4).

$$\Omega_{eq} = \left[\sum_{i=1}^{2\phi} 10^{-i/\phi} \right]^{-1} \sum_{i=1}^{2\phi} \Omega_i 10^{-i/\phi} \quad (9)$$

Mientras “ShoreFor” es un modelo de línea de la playa de equilibrio, la posición de equilibrio varía con el tiempo (Ω_{eq} , ec. 9) y se basa en el estado de la playa (en lugar de una posición de la costa). Por lo tanto, los cambios en Ω con respecto a Ω_{eq} conectan directamente el transporte de sedimentos que ocurre de la zona de surf con la respuesta resultante para la

línea de costa. Siguiendo el enfoque propuesto por Davidson el estado de equilibrio variable temporalmente de la playa se estima siguiendo la formulación propuesta por Wright et al., 1985.

De la (ec.9), i es el número de días hacia atrás medidos desde el presente y el factor de respuesta (ϕ) es un coeficiente de modelo. El factor de respuesta representa el número de días en el pasado necesarios para lograr el equilibrio de la línea costera, cuando el factor de ponderación se reduce en términos de ϕ corresponden a ϕ , 2ϕ , y 3ϕ días antes del día actual respectivamente. La formulación de Davidson et al., 2013, incorpora toda la información del estado de playa pasado durante los últimos 2ϕ días (es decir, con un factor de ponderación mínimo de 1%). Por lo tanto, la condición de equilibrio (Ω_{eq}) está en constante evolución y mantiene una "memoria" ponderada de las condiciones y antecedentes de la zona de rompientes de la costa litoral.

Para efectos de comparación entre sitios de coeficientes del modelo, el flujo de energía (P , ec. 6) y la velocidad de caída adimensional (Ω , ec.1) se calcularon usando la altura significativa a la profundidad de rompiente $H_{s,b}$, ya que se considera que esta representa mejor la onda local obligando a un cambio litoral en cada sitio. La altura de ola al rompimiento $H_{s,b}$ fue estimada a partir de los parámetros del oleaje en aguas profundas ($H_{o,s}$ y T_p), siguiendo la formulación propuesta por Komar (1974).

$$H_{s,b} = 0.39g^{1/5}(T_p H_{o,s})^{2/5}, \quad (10)$$

Donde g (m/s^2) es la aceleración debida a la gravedad, y $H_{o,s}$ (m) la altura significativa de las olas en aguas profundas.

2.3. Expectativas del modelo y limitaciones

La formulación del modelo presentado anteriormente describe la variación temporal de la posición de la línea de costa debido a cambios en las condiciones del oleaje, y como tal, es el más adecuado para lugares donde las olas son el principal impulsor de la respuesta costera. El modelo no tiene en cuenta los procesos de corta escala, tales como interrupciones en la barra sumergida de sedimentos, formaciones y procesos costeros particulares como *beach cusp* o corrientes de desgarró (*rip currents*). El modelo es apropiado de preferencia para sectores costeros en los que es posible promediar los datos de línea de costa para limitar el impacto de los procesos de corta escala temporal (Splinter et al., 2014).

De igual forma, costas protegidas o sectores que experimentan grandes rangos de mareas, tampoco son bien representados por el modelo actual.

Oscilaciones climáticas que alteren el nivel del mar como fenómenos del Niño (ENOS) o *set up* debidos a oleajes de tormenta, tampoco son bien considerados en esta formulación. Cuando estos procesos tienen potencialmente un impacto lineal constante sobre las modificaciones del litoral (por ejemplo, el aumento del nivel del mar), estos pueden ser modelados por el término de tendencia lineal (b) (Splinter et al., 2014).

Modificaciones del litoral debido a los gradientes en el transporte litoral y/o en variaciones espaciales de tierra/sin tierra, suministro/pérdida de arena también puede ser capturado en la presente formulación por el término de tendencia lineal, sin embargo, no existe discriminación de los efectos de estos procesos sobre el cambio de litoral. Cuando estos procesos no son constantes en el tiempo (multidecenal), esta variabilidad no se modela con precisión. Como tal, se predice que este enfoque modelado es el más adecuado en costas micro meso-mareales, expuestas a las ondas sobre los marcos de tiempo de años a décadas (Splinter et al., 2014).

2.4. Cálculo del error

Para el cálculo del error se utilizaron tres estadísticos propuestos por Splinter et al., 2014. Si bien en la formulación original se propone un intervalo de muestreo de 30 días para facilitar la comparación objetiva entre sitios, en este trabajo se evaluaron los estadísticos en función de la amplitud de los registros que se abordaron, los cuales no superaron los 2 meses.

El primer parámetro utilizado para la comparación es el de correlación (R) entre las series temporales de costa observada y las predicciones del modelo (Splinter et al., 2014). El cual se calculó a través de la siguiente expresión:

$$R = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (11)$$

Donde σ_{xy} covarianza común de las variables medidas, σ_x desviación típica de la variable x, σ_y desviación típica de la variable y. La figura No. 2.7, muestra una interpretación de los posibles resultados de error para el coeficiente de correlación R.

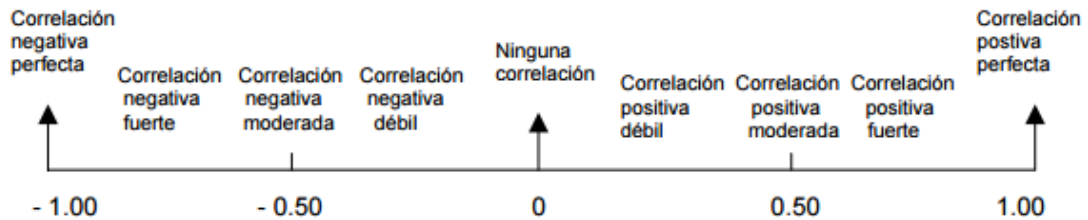


Figura 2.7: Interpretación del coeficiente de correlación R.

El segundo método utiliza las “Brier Skills Score” (Sutherland and Soulsby, 2003) y tiene en cuenta el error de medición en los datos (Δx) (Splinter et al., 2014).

$$BSS = 1 - \frac{\sum[|x - x_m| - \Delta x]^2}{\sum(x - x_b)^2}, \quad (12)$$

Donde x es la línea de costa observada, x_m es la línea de la playa del modelo, y x_b es dato de referencia. Se puede estimar x_b igual a la tendencia lineal de los datos con el fin de determinar cuando la capacidad del modelo es realmente debido a la captura de la respuesta costera provocada por la variación en los procesos litorales, y no por la tendencia lineal simple (es decir, la integración en el tiempo de b en (ec. 3)). BSS positiva indica que el modelo es una mejora sobre la tendencia lineal de la línea base, y los valores de habilidad descriptivos superiores a 0 se resumen en la Tabla No. 2.2. (Splinter et al., 2014).

El error cuadrático medio normalizado (NMSE) compara la diferencia del error real con el observado. NMSE se elige sobre la raíz del error cuadrático medio (RMSE) como los resultados en modelos de datos individuales se normalizaron por la varianza de las observaciones (x) en cada sitio, proporcionando de este modo un método superior para comparación entre sitios. Aquí la fórmula utilizada por Miller y Dean (2004b) y Splinter et al. (2013b) se adopta, (Splinter et al., 2014):

$$NMSE = \frac{\sum(x - x_m)^2}{\sum x^2}, \quad (13)$$

Un valor de $NMSE = 0$ indica que el modelo captura perfectamente todos los puntos, mientras que un $NMSE = 1$ indica la varianza del error (numerador de la ec. 13) es igual a la varianza de las observaciones (denominador de la Ec. 13) y por lo tanto el modelo no tiene ninguna habilidad. Similar a la BSS, un rango de habilidad NMSE descriptiva se resume en la Tabla No 2.2. (Splinter et al., 2014).

Tabla 2.2: Resumen de evaluaciones de los métodos Brier Skills Score (BSS) y el error cuadrático medio (NMSE). Extraído de Splinter et al, 2014.

Skill	BSS	NMSE
Pobre	0-0.3	> 0.8
Justo	0.3-0.6	0.6-0.8
Bien	0.6-0.8	0.3-0.6
Excelente	> 0.8	< 0.3

3. Capítulo III. Implementación modelo *ShoreFor*

A continuación, se presenta la metodología que se aplicó para implementar el modelo *ShoreFor* propuesto por Davidson et al., 2013.

Se hará referencia a la zona de estudio, señalando ubicación y características climatológicas del área de estudio.

Para la calibración del modelo se hará mención de cómo se obtuvo los datos a partir de las recopilaciones de las video imágenes obtenidas gracias a los transectos ubicados en la zona de estudio.

La información del oleaje se obtuvo a partir del modelo de reanálisis de oleaje WaveWatch III desarrollado por la NOAA (Tolman, 1989; 2002b), en la que se seleccionó un nodo virtual cercano a la zona de estudio y se extrajeron los datos de oleaje para los periodos en los que se tenían observaciones de un sistema de monitoreo costero por video instalado en la zona de estudio.

Como tamaño medio de sedimento de las partículas se ocupó un $d_{50} = 0,4\text{mm}$ para ocupar en este modelo.

3.1. Área de estudio

El lugar donde se aplicará el modelo *ShoreFor* está ubicado en la Provincia de Curicó, VII Región del Maule, específicamente en la desembocadura del río Mataquito y la zona costera adyacente ($34^{\circ}52'S$, $72^{\circ}09'W$) existe un estuario estrecho y poco profundo, que se encuentra en el centro de Chile, con una configuración morfológica caracterizada por una lengua de arena de 9 kilómetros de largo, ver figura No.3.1. Este escenario cambia drásticamente después del tsunami chileno de 27 de febrero de 2010. Se ha estudiado su proceso de recuperación in situ a través de mediciones video costeras. La recuperación del

sistema fue sorprendentemente rápida, lo que indica un alto grado de resiliencia para esta forma de relieve natural (Villagrán et al., 2011). Después del evento de tsunami una nueva configuración de la entrada de río surgió, al pasar de un estuario dominado por el río, normalmente abierto, a una configuración mas similar a una laguna costera con una única conexión con el mar que depende del caudal de agua que trae el río (Villagrán et al., 2014).

El río Mataquito se origina de la confluencia del río Teno, que drena la porción norte del área, y del Lontué, que drena la porción sur. Dicha conjunción se produce a 12 km al W de Curicó; desde aquí el Mataquito serpentea por un valle ancho en dirección general al W hasta desembocar en mar abierto después de un recorrido de 95 km. Recibe afluentes de escasa consideración, prácticamente todos generados en depresiones de la cordillera de la Costa (Cuenca Río Mataquito, 2004).

Su desembocadura se encuentra a 50 km al norte de la desembocadura del río Maule (Figura No. 3.1). En la desembocadura del río, el flujo se desvía hacia el norte por un sistema de dunas (dunas Putu). La línea de costa en la desembocadura del río está totalmente expuesta a la acción de las olas del Pacífico Sur, formando una larga barra de sedimentos y un estuario protegido detrás de él (Villagrán et al., 2014).



Figura 3.1: Área de estudio del río Mataquito ubicación general, que muestra la dirección litoral y Norte, y una porción de playa de arena. Extraído y adaptado de google earth.

3.1.1. Climatología y precipitaciones

La cuenca del río Mataquito se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, es decir, existen al menos dos meses consecutivos del verano con déficit hídrico. La condición geomorfológica general determina la existencia de ombroclimas que varían de húmedo a subhúmedo, dependiendo de los montos de precipitación. En la zona costera el clima es Mediterráneo pluviestacional – oceánico: influyendo los sectores costeros, la Cordillera de la Costa, el Valle Central y los pisos inferiores de la Cordillera de los Andes, bajo los 2.000 m.s.n.m. (Cuenca Río Mataquito, 2004).

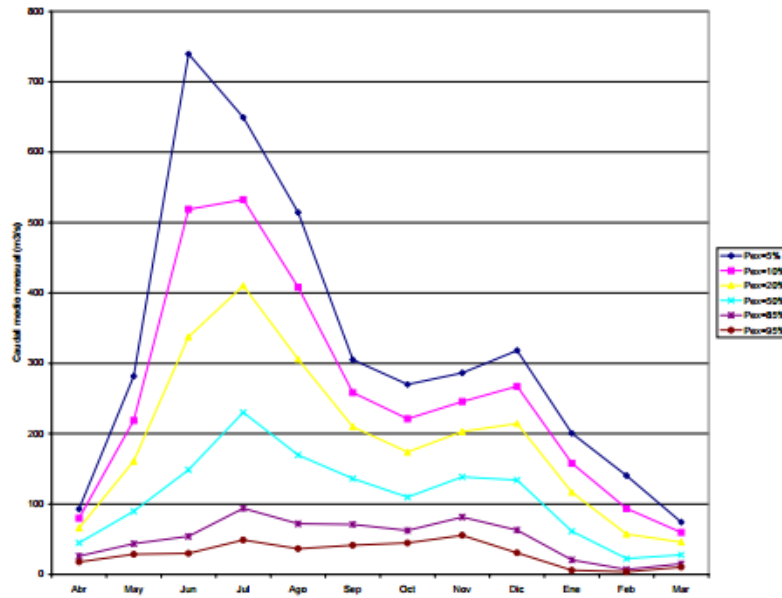


Figura 3.2: Curva de Variación Estacional Río Mataquito en Licanten. Extraído Cuenca Río Mataquito, 2004

Esta subcuenca del Mataquito tiene un régimen pluvio-nival, con mayor predominancia pluvial conforme se baja en elevación. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre junio y agosto, producto de los importantes aportes pluviales, como se aprecia en la curva de variación estacional de la figura No. 3.2., donde muestra un aumento en los caudales en los meses desde junio a agosto. El período de menores caudales ocurre en el trimestre dado por los meses de febrero, marzo y abril (Cuenca Río Mataquito, 2004).

La topografía local es empinada y estrecha, principalmente debido a la presencia de una cadena montañosa cerca de la costa (Villagrán et al., 2013).

La altura de las olas a lo largo del banco de arena es bastante constante a lo largo del año, con fuertes marejadas provenientes del Océano Pacífico Sur que producen una corriente litoral altamente energética. Las mediciones in situ de onda de oleaje no están disponibles, pero la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) proporciona el nodo más cercano con una media anual de altura de ola significativa de 2,7 m, con un período máximo de 11,7 s. La marea en Mataquito es semidiurna y micro-mareales con rangos de marea entre

0,3 m (marea muerta) a 1,5 m (marea viva). Durante las tormentas, el nivel del mar puede aumentar en 1 a 2 m, debido a las *storm surges* y al viento (Cienfuegos et al., 2014).

3.2. Levantamiento de información de campo

Hay muchas maneras de evaluar la evolución de las costas, sin embargo, uno de los métodos más novedosos se basa en los sistemas de vigilancia de imágenes vídeo costeras. Esta técnica puede proporcionar una alta resolución temporal y espacial de un sitio en estudio, y durante la última década se ha convertido en una herramienta muy útil (Paterson et al., 2000; Morris et al., 2001, 2007; Freire et al., 2011).

Trabajos anteriores han investigado la variación morfológica de la zona costera, como por ejemplo las funciones que utilizan imágenes de vídeo, el comportamiento de migración de canales de descarga (por ejemplo, Paterson et al., 2003; Morris et al., 2001), la estimación de los cambios de volumen de arena (por ejemplo, Smith & Bryant, 2007) o la migración de los bancos de arena sumergidos (por ejemplo, Armaroli y Ciavola, 2011; van Enckevort y Ruessink, 2003; Ruessink et al., 2013; Holanda et al., 1997) y la detección de la costa (Plant et al., 2007; Almar et al., 2012). Estos ejemplos han demostrado el interés de la utilización de los sistemas de vigilancia de vídeo para evaluar morfológicamente cambios que ocurren en diferente tiempo de escala a lo largo de la costa, complementando los datos adquiridos utilizando mediciones tradicionales in situ (Cienfuegos et al. 2014).

3.3. Transectos

Anteriormente se indicó la zona de estudio para aplicación del modelo *ShoreFor*, allí, es donde se encuentra la estación de monitoreo con los instrumentos de medición de las imágenes video costeras, que se utilizarán para la calibración y validación del modelo en el sector a estudiar durante la fecha de 15 de agosto de 2013 hasta 12 de octubre 2013. Específicamente las coordenadas donde están ubicados estos instrumentos son (35°S; 72,5°W). En dicho lugar, esta herramienta de control mide el trayecto a lo largo del cual se realizan las observaciones de medición para la validación de los resultados del modelo.

Esta herramienta de medición consta de un sistema de video vigilancia costera, y se compone de dos cámaras IP con una resolución de 2 megapíxeles cada una (Vivotek IP7161), apuntando hacia la desembocadura del río Mataquito, montadas en un poste de madera de 6 m que se encuentra en la cima de la colina a mas de 155 m.s.n.m. orientación suroeste, y se promediaron las imágenes capturadas para caracterizar la evolución del *sand spit* (Cienfuegos et al., 2014), ver figura No 3.3. Cámara 1 (Cam1) toma imágenes de un tramo recto de casi 1 km, mientras que la cámara 2 (Cam2, con vista panorámica) proporciona una buena imagen general, de todo el sistema durante un largo tramo de 3 km, incluyendo el estuario y la desembocadura del río, cómo y dónde viaja desde la boca del río a lo largo de la costa. Esta cámara también se utiliza para controlar la extensión de la playa y para observar la lenta migración de la desembocadura del río hacia el norte (Villagrán et al. 2013).

Las imágenes oblicuas capturadas por las dos cámaras de vídeo se transfieren a través de señal Wi-Fi a un equipo en el que el video es procesado para guardar solamente imágenes (es decir *Timex*, *snapshot* y *timestacks*) y luego se suben a un servidor de Internet (véase también Cienfuegos et al., 2014).

El *snapshot* (instantánea) ofrece poca información cuantitativa, las imágenes *Timex* proporcionan mucha más información y las imágenes *timestack* a partir del cual se calcula la velocidad corriente litoral.



Figura 3.3: Imagen de cámara de video vigilancia ubicada en la cima de la colina que rodea la boca del río Mataquito.

3.3.1. Extracción de datos para calibración

La vídeo monitorización del sistema almacena al día un promedio de vídeo imágenes cada 15 minutos, además de una instantánea (*snapshot*) del estado de mar al comienzo de cada período de grabación. Esta información proporciona información con respecto a las condiciones del oleaje, y la evolución morfodinámica en el sitio de estudio. Las cámaras fueron instaladas en diciembre de 2012, sin embargo, sólo desde el 15 de agosto de 2013 se ha obtenido un registro continuo de imágenes, fecha desde donde se comenzará a calibrar el modelo de esta tesis (Villagrán et al. 2013).

Luego de almacenar las video imágenes, estas deben ser rectificadas utilizando un algoritmo programado en Matlab y para ello se utilizan puntos de control tomados previamente. En la siguiente imagen se muestra espacialmente la ubicación de los transectos, aquí se indica que se procedió a extraer manualmente el punto de intersección de la línea de costa, línea roja con números (ver figura No. 3.4). Gracias a este método se generó una base de datos de mediciones para un periodo comprendido entre el 15 de agosto y 12 de octubre.

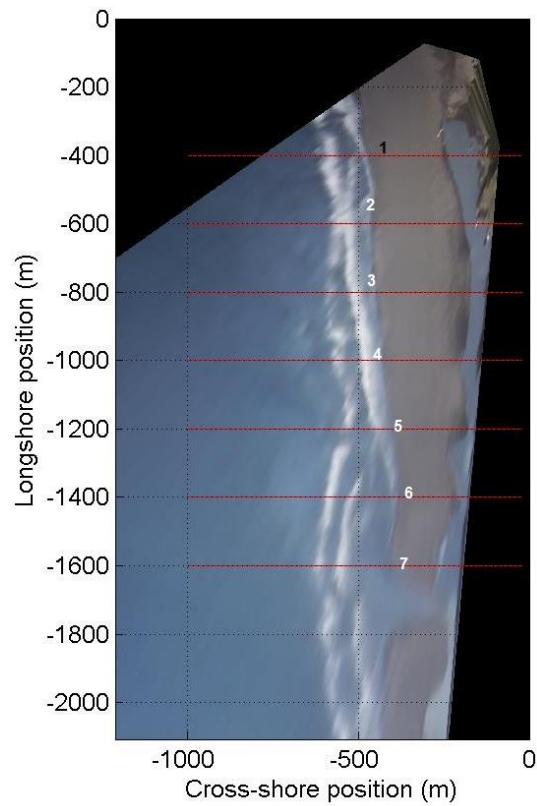


Figura 3.4: Imagen rectificada

La validación del proceso de rectificación se hizo comparando las imágenes rectificadas con un levantamiento topográfico de toda la barra de arena realizado con un GPS RTK montado en un vehículo 4X4 (ver Figura 3.5). Ambas imágenes se fusionaron creando una visión única de la barra de arena. Se obtuvo un buen nivel de resultados entre el levantamiento RTK y los puntos de control GPS en las imágenes rectificadas (Cienfuegos et al. 2014).

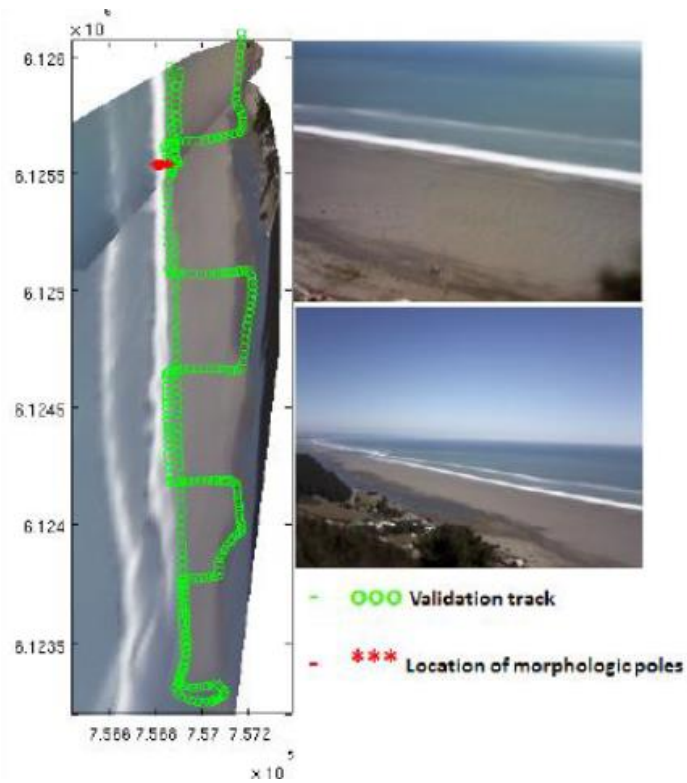


Figura 3.5: Promedio de imágenes proporcionadas por el sistema video costero de supervisión (paneles de la derecha) y las imágenes rectificadas en comparación con pistas DGPS (puntos verdes) y el estudio en el lugar donde barras verticales fueron desplegados en la “beach face” (puntos rojos). Extraído de Cienfuegos et al. 2014.

Gracias a la información dada por estos sistemas de monitoreo y al procesamiento en los datos fue posible obtener la figura No. 3.6. donde se observa líneas con mediciones de la variación de la línea de costa a lo largo de la playa desde 15 de agosto hasta 12 de octubre de 2013, se muestran seis líneas en distintos colores que representan las trayectorias de los seis transectos.

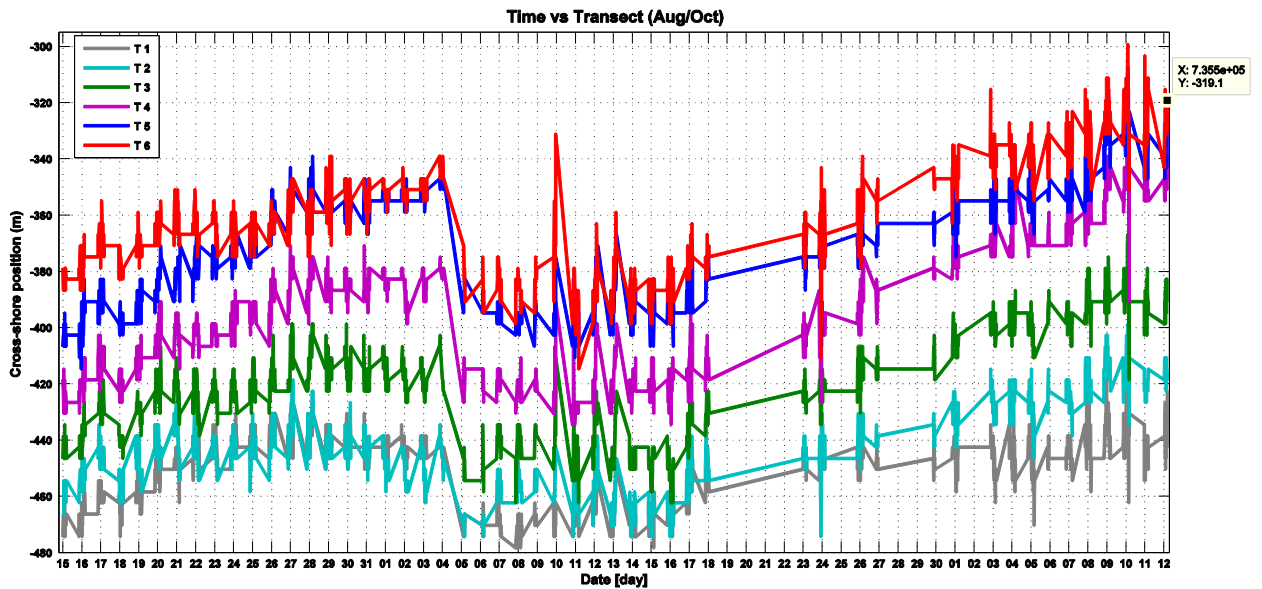


Figura 3.6: Tiempo v/s Transectos. Evolución de la Playa en la zona de estudio desde 15/08/2013-12/10/2013 medida a través de los transectos.

3.4. Procesamiento de los datos

La información entregada por la gráfica No.3.6., muestra líneas artificiales a la costa que se dibujan en la imagen de la cámara promediada (figura No.3.4) y luego se obtiene el punto de intersección de la línea de costa para cada transecto, todos esos puntos dibujados en el tiempo se transforman en el gráfico de la figura No. 3.6.

Cabe mencionar, que es necesario reordenar esta base de datos, para obtener un solo valor diario por cada transecto, esto se realizó a través de la obtención de un promedio diario del total de datos para cada transecto, con esto fue posible obtener la base de datos exacta para cada caso temporal: días, semanas y dos semanas.

Con la totalidad de los promedios diarios de los transectos para cada caso a analizar, fue posible obtener la diferencia de la variación de la línea de costa.

Para el caso diario, esta variación de la línea de costa se realizó a través de una diferencia simple entre el valor de dos días consecutivos, guardando este dato y calculando el siguiente de la misma manera, como se ve en (ec.14).

$$\text{día } 1 - \text{día } 2, \text{día } 2 - \text{día } 3, \text{día } 3 - \text{día } 4 \dots \dots \dots, \text{día}(n) - \text{día } (n + 1), \quad (14)$$

Finalmente, se obtuvo, el total de diferencias por día, con la cual fue posible conocer la gráfica de la variación real de la línea de costa.

Las gráficas de las variaciones de la línea de costa se realizaron según escalas temporales, donde se promediaron sus valores para un día, siete días y catorce días. Ver figuras No 4.1, 4.2, 4.3.

Para el caso de la escala temporal de siete días, se obtuvo la diferencia simple igualmente que en ec.14, pero en este caso, la diferencia entre los valores de la “semana 1”- “semana 2”, corresponde a el promedio de datos de los siete días para la semana 1, y el promedio de datos de los siete días para la semana 2.

Así mismo para el caso de la escala temporal de catorce días, el promedio de datos se obtuvo de los primeros catorce días para las primeras dos semanas, para las siguientes dos semanas se obtuvo el promedio de datos de los sucesivos catorce días, y así sucesivamente. Para obtener la variación de la línea de costa, se realizó igualmente que en la ec. 14.

3.5. Resumen de la metodología aplicada

Se realizó un análisis espacio-temporal de la línea de costa durante el año 2013, para conocer y caracterizar la línea de costa a través del modelo de Davidson et al., 2013, fue necesario extraer los datos de dirección, altura y periodo para ese mismo año, a través del reanálisis WWIII, gracias a esta herramienta y con la información completa de los datos reales entregada por las video imágenes, fue posible implementar el modelo *ShoreFor*.

Se debe indicar que los datos de altura, dirección y periodo, extraídos del modelo de reanálisis de oleaje WaveWatch III, estaban medidos cada tres horas, por lo que en un día se tienen ocho datos diarios, los cuales son ingresados al algoritmo creado en Matlab imitando el modelo de Davidson et al., 2013. Este mismo procedimiento se realizó con los 56 datos para el caso de la escala temporal de siete días, y 112 datos para la escala temporal de catorce días.

Luego de haber ingresado al código las variables como los datos de dirección, altura y periodo, así como también datos de diámetro de sedimento (d_{50}), densidad del agua, gravedad, etc. Se calculó la profundidad significativa en rompiente de altura de las olas ($H_{s,b}$), a través de la (ec.10), con este dato se calculó el valor de la energía de ola significativa en rompiente, E (ec.7), para luego calcular la velocidad de grupo C_g .

Con C_g y E , se calculó el valor de la energía de onda, P , según (ec.6).

Luego con el mismo valor de $H_{s,b}$, se calculó el valor de velocidad de caída adimensional Ω a través de la (ec.1).

Este código tiene los mecanismos necesarios para obtener las distintas variables que se ven en la ecuación de variación de la línea de costa (dx/dt) en (ec. 3)., del autor Splinter et al., 2014.

El factor ϕ , es un factor de respuesta que representa el número de días en el pasado para un dato, por lo tanto, este parámetro está en constante evolución y mantiene una “memoria” ponderada de las condiciones anteriores de la zona de rompientes en la línea de costa, ϕ (días), se aplicó al código con el mismo valor de ϕ para toda la escala temporal: días, semanas y dos semanas. Se usaron distintos valores de ϕ (entre 10 y 50 días), con el fin de mostrar cuan distinto es el resultado al momento de tener valores pequeños de ϕ y al compararlo con valores altos.

Este parámetro ϕ , fue utilizado en la (ec. 9) para obtener la posición de equilibrio y así obtener el término de velocidad de caída de desequilibrio adimensional ($\Delta\Omega$) (ec. 8)

Posteriormente se calculó la desviación estándar a la velocidad de caída. Para finalmente realizar el cálculo del término de forzamiento F según (ec. 5). Con los distintos valores de $F+$ y $F-$ se puede calcular el término de erosión r a través de la (ec.4).

Cabe mencionar que el valor del parámetro de la erosión r , se debe ajustar como dice la (ec. 4), eliminando la tendencia lineal de los datos, esto se realizó a los datos obteniendo el valor de r *fijo* de acuerdo a lo planteado en Davidson et al., 2013, donde para una misma escala temporal se obtuvo un valor de r *fijo* para todo el set de datos.

Se debe mencionar que con el fin de mejorar la estimación de los parámetros del modelo se realizó un análisis de sensibilidad del parámetro r , haciéndolo variar diariamente y no en base a un valor fijo para el periodo como lo indica Davidson (r *móvil*).

Posteriormente, ingresando al código y enseñándole los valores de libre elección elegidos a priori, fue posible obtener el primer dato del “día uno” de la variación de la línea de costa. Luego se aplicó el mismo código al “día dos” y así sucesivamente hasta completar la fecha requerida.

Se debe tener precaución que el código se aplica según la cantidad de datos necesarios, por ejemplo, para obtener una medición diaria, se modifica el código ingresando la fecha de inicio y final, contando en total los ocho datos diarios, que son capaces de medir los transectos. Para el caso de obtener una medición semanal, la fecha de inicio y fin debe corresponder a los 56 datos en la semana. Y para el caso de dos semanas, exactamente el mismo procedimiento, en total corresponde a 112 datos.

Por otro lado, obteniendo cada variable de la (ec.3) a través del código, se traspasaron estos datos a planillas en Excel donde fue posible ir variando los valores de los parámetros b y c , para así obtener un mayor ajuste comparado con los datos reales.

También se calculó el error medio para cada caso utilizando las ec. 11, ec.11, y ec. 13. Luego con los resultados de estos errores se hizo la comparación de sus evaluaciones con la tabla No.2.2 y la figura No. 2.7. En anexo 6 se muestra como se obtuvo el valor de x_b utilizado en la ec. 12.

4. Capítulo IV. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a través del modelo, partiendo por calibrar la condición de equilibrio Ω_{eq} , para lo cual se debió determinar el parámetro ϕ , con estos valores calculados se muestran las distintas escalas de tiempo para la variación de la línea de costa.

4.1. Resultados transectos

En las figuras No.4.1, No. 4.2., y No. 4.3., se muestran los datos entregados por los puntos de intersección promedio para cada transecto seleccionado a partir de diferentes variaciones temporales (días, semanas y dos semanas). Los datos corresponden a mediciones recolectadas entre 15/08/2013 y el 30/09/2013. De estas graficas se puede observar una cierta tendencia a la acreción, debido a que la línea de tendencia en estos datos también lo refleja.

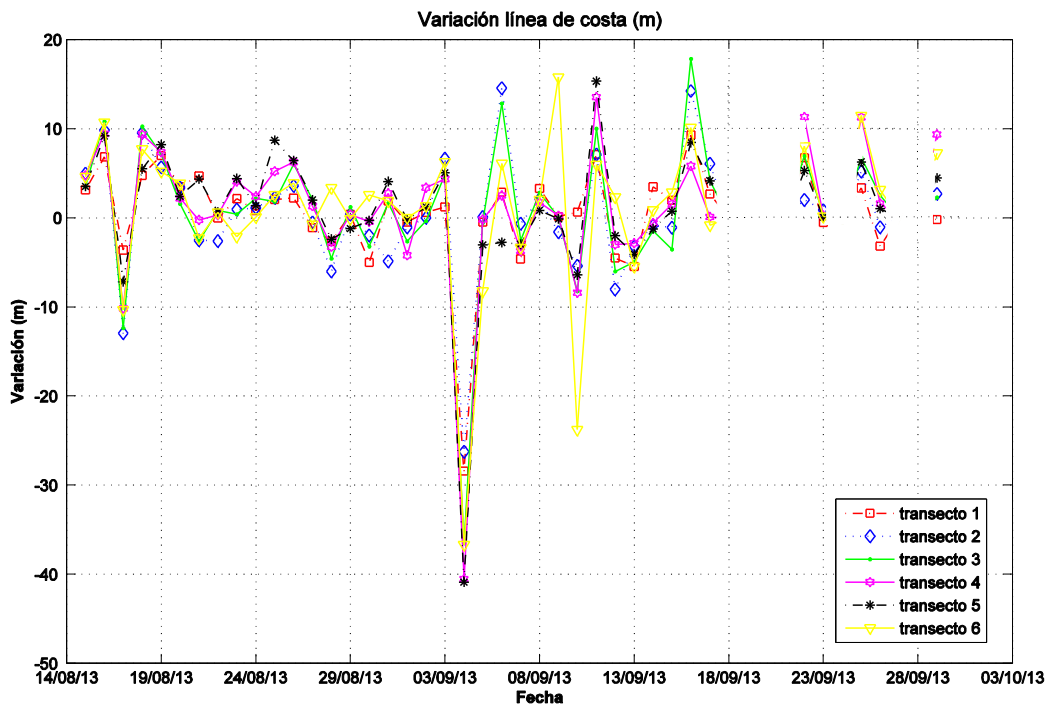


Figura 4.1: Variación línea de costa en metros para análisis diario.

En la figura No.4.1, se observan una discontinuidad en los datos entre la fecha 18/08/2013 al 21/08/2013, esa falta de datos se debe a que en esa fecha el sistema de monitoreo por video no estuvo operativo.

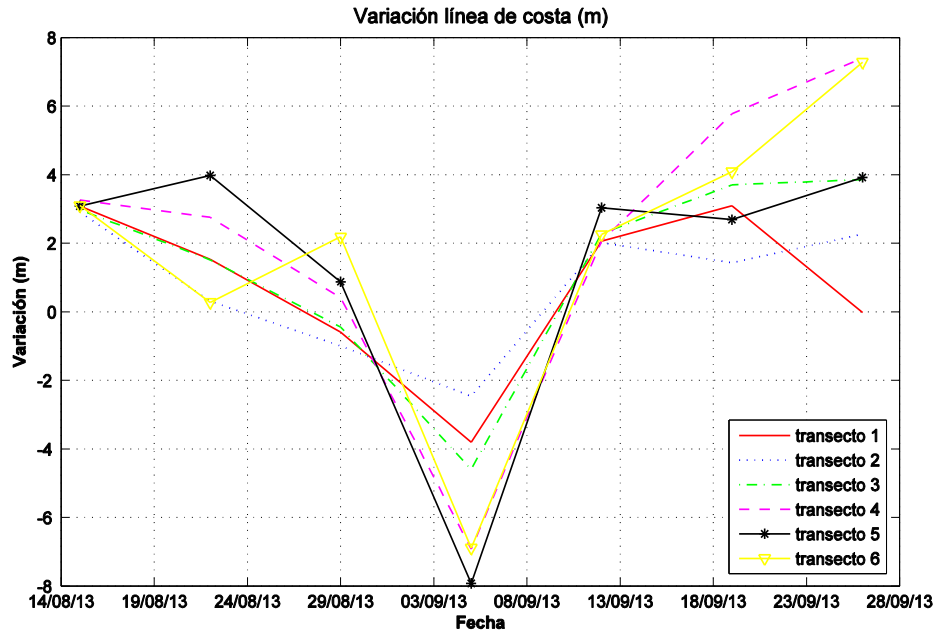


Figura 4.2: Variación línea de costa en metros para análisis semanal.

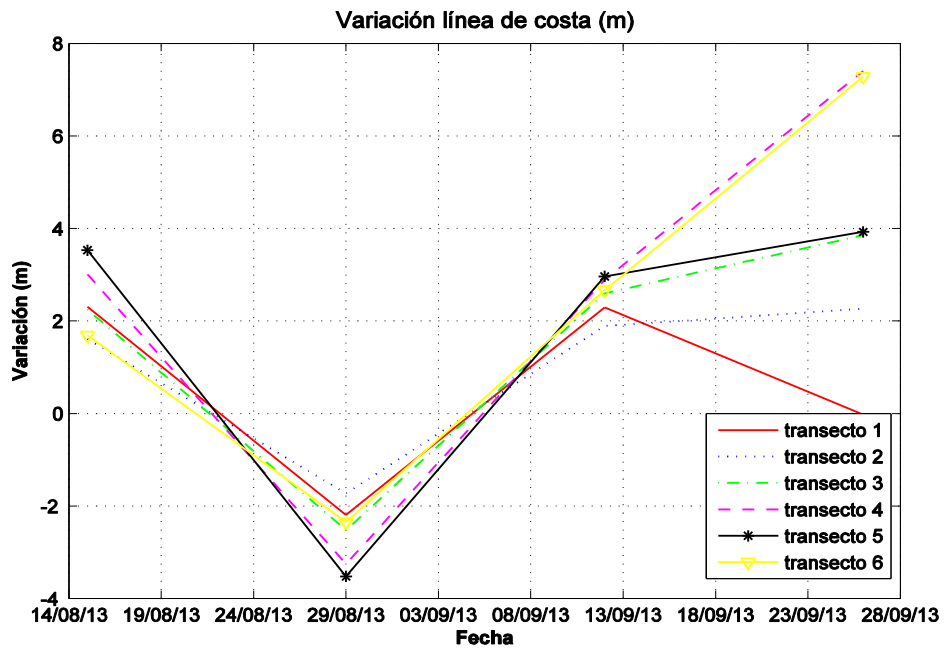


Figura 4.3: Variación línea de costa en metros para análisis bi-semanal.

En las figuras No. 4.2 y No. 4.3 se observa la misma tendencia a la acreción de los datos que en la figura No. 4.1., también se aprecia una cierta dispersión en los datos en las últimas semanas, donde algunos transectos tienden a bajar en su medición, mostrando erosión en sus resultados. En la figura No. 3.6. se puede observar que existen cambios bruscos en la ubicación de la línea de costa, los cuales coinciden en varias ocasiones con condiciones en que el sistema de video dejaba de operar debido a malas condiciones ambientales, es decir, las tormentas locales producen erosiones importantes que no fueron detectadas en detalle por el monitoreo.

4.2. Estimación de la condición de equilibrio inicial (Ω_{eq})

Para obtener la condición de equilibrio inicial Ω_{eq} , se debe estimar primero el cálculo del parámetro ϕ (días) del modelo, este parámetro está elegido según la cantidad de días en el pasado, por lo tanto, para estimar el Ω_{eq} , se optó por valores entre 10 y 200 días.

Para estimar cuanto varía el valor del Ω_{eq} , se calculó el valor mínimo y máximo para cada caso, luego se calculó su diferencia y promedio, esta diferencia indica cuanta dispersión existe entre estos valores. Para mayor detalle se obtuvo la desviación estándar de la muestra para 60 días y para 30 días, en el pasado.

Tabla 4.1: Resultados de coeficientes estadístico para distintos factores de respuesta.

Caso	ϕ	Ω_{MAX}	Ω_{MIN}	DIF	$\bar{\Omega}_{eq}$	$\sigma_{\bar{\Omega}_{eq}60}$	$\sigma_{\bar{\Omega}_{eq}30}$	$\sigma_{\bar{\Omega}_{eq}60}/\sigma_{\bar{\Omega}_{eq}30}$
Análisis Diario	10	4,22	2,58	1,64	3,42	1,19	1,16	1,02
	50	3,96	2,98	0,98	3,41	0,80	0,72	1,10
	200	3,69	3,22	0,47	3,45	0,45	0,28	1,59
Análisis Semanal	10	3,85	3,13	0,72	3,41	0,73	0,74	0,99
	50	3,76	3,19	0,56	3,42	0,68	0,46	1,47
	200	3,66	3,26	0,39	3,45	0,45	0,26	1,74
Análisis bi-semanal	10	3,65	3,17	0,48	3,40	0,60	0,58	1,04
	50	3,55	3,20	0,36	3,41	0,48	0,23	2,08
	200	3,54	3,29	0,25	3,43	0,41	0,07	5,97

De los resultados de la tabla No 4.1, se seleccionaron los valores de factor de respuesta $\phi=10$ días y $\phi= 50$ días para continuar con el análisis, ya que se observa una muy baja variación de Ω_{eq} para valores mayores a estos. Por lo tanto, esto confirma que mientras mayor es el factor de respuesta, menor es el cambio en la desviación, por lo que los datos cada vez se alejan menos del promedio de los datos.

4.3. Resultado parámetro de erosión, r

Según lo establecido por Splinter et al., 2014, el parametro de erosion r debe ser calculado a partir de la tendencia lineal del total de datos de la sumatoria de los términos de forzamiento $F+$ y $F-$, como producto se obtiene un solo valor de r (r fijo), valor que se utilizará para graficar la variación de la línea de costa.

A modo de ajuste de calibración para esta tesis, se ajustó este parámetro de erosión para cada día, esto se realizó igual que el cálculo de Splinter et al., 2014, pero la diferencia es que el nuevo r móvil contiene la sumatoria de los datos del primer valor de su respectiva escala de tiempo, y así el siguiente r móvil contiene la sumatoria de datos del segundo valor de la escala de tiempo, hasta completar todos los valores de la escala temporal.

La figura No.4.4 muestra un resumen de los valores obtenidos del parámetro de erosión r fijo y r móvil obtenidos a través del modelo para las distintas escalas temporales usadas. De estas curvas se aprecia un cambio importante entre los valores diarios y semanal, lo que se puede explicar ya que los valores entregados por el modelo para la escala diaria son datos específicos y puntuales, no así para el caso semanal, donde existe un promedio de estos datos por lo que su valor disminuye.

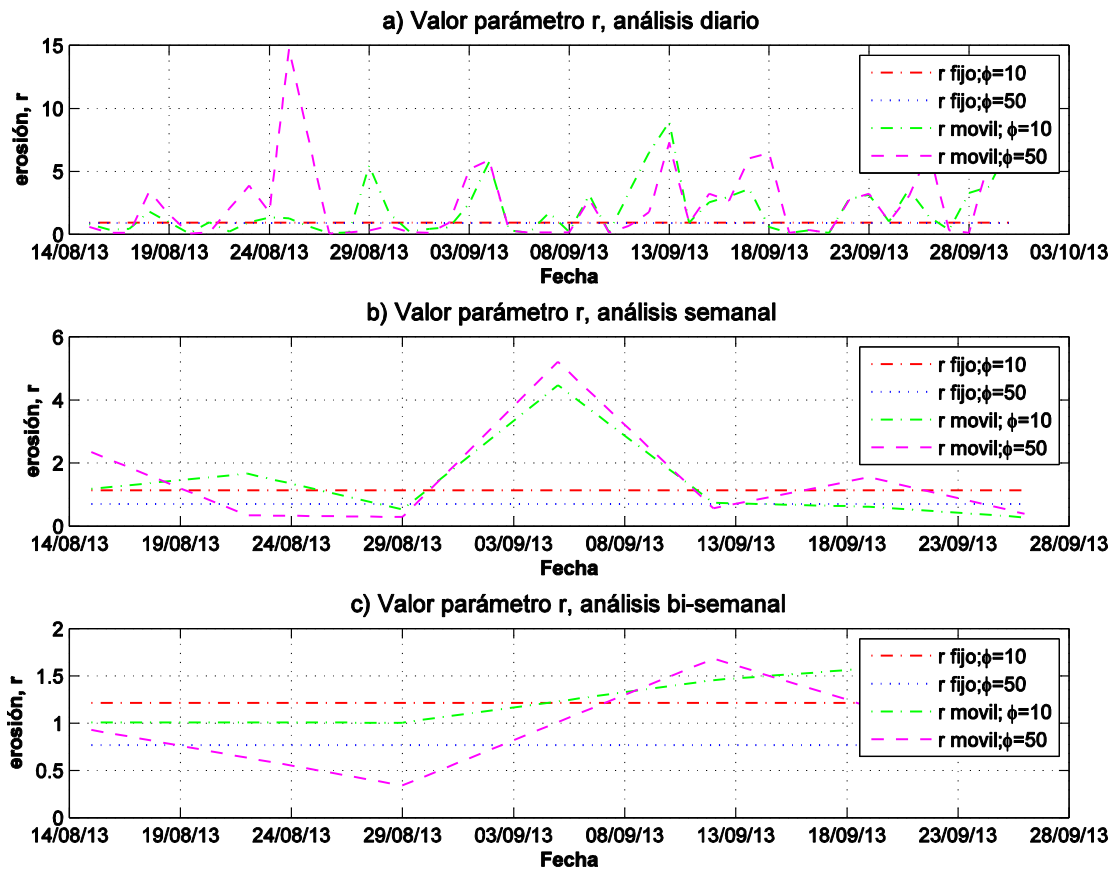


Figura 4.4: Resultados parámetro de erosión para análisis diario, semanal y bi-semanal.

4.4. Calibración de parámetros

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para el modelo propuesto por Davidson et al., 2013, se presentarán por separado los análisis diario, semanal y bi-semanal.

4.4.1. Análisis diario

En este capítulo se expondrán los resultados de la variación de la línea de costa, para la escala temporal diaria, desarrollado a través del modelo “*ShoreFor*”, primero se mostrarán las gráficas con el valor del parámetro erosivo *r fijo* y luego el *r móvil* según los valores seleccionados del factor de respuesta $\phi=10$ días y $\phi= 50$ días.

Se mostrarán dos casos para calibrar el modelo comparado con las mediciones de los transectos 2 y transecto 6 con el fin de mostrar cuál de estos tiene mejor ajuste.

Se hará una comparación de resultados para los transectos 2 y transecto 6, ya que si se observa la figura No 4.2. el transecto 6 muestra valores más extremos comparados con los valores del transecto 2 que son valores medios, además es importante indicar que el transecto 2 se localiza más cerca de la cámara por lo que su resolución espacial es de mejor calidad que la del transecto 6, por lo tanto, se ajustarán con distintos parámetros el modelo para ambos transectos.

Calibración modelo diario

Caso 1: Transecto 6

La figura No. 4.5., muestra la variación de los datos medidos por el transecto 6 con respecto a los resultados del modelo *ShoreFor*, se debe mencionar que para la línea de los datos del modelo no existen datos en los primeros dos días, esto debido a tres desfases temporales a tomar en consideración: primero uno asociado al momento de medición, segundo un desfase asociado a la propagación del oleaje y tercero un desfase asociado a la

fecha de cálculo que usa el modelo, esto sucede ya que los datos del transecto están medidos con un desfase aproximado de 6 horas, también existe desfase en la medición, ya que esta medida no en la misma línea de costa, sino que tarda en llegar entre 3 a 5 horas a la línea de costa. Es por esto que en las gráficas siguientes no existirán datos en los primeros días debido al desfase de aproximadamente 2 días.

En la tabla No. 4.2 y figura No.4.5, se muestra un resumen con los parámetros de calibración del modelo utilizados para calcular la variación de la línea de costa, también se muestran los respectivos resultados de los parámetros de error.

De la figura No 4.5.a) y No. 4.5.b), se observa que existe un desfase de algunos días entre los resultados reales y los resultados del modelo al aplicar un parámetro de *r fijo* para todos los días, lo que se ve reflejado en los resultados de los parámetros de error (ver tabla No.4.2), que están muy lejanos a valores excelentes. Comparando las tablas No. 2.2 con la tabla 4.2., el modelo muestra una muy baja relación entre los resultados de los parámetros de error, es por eso que, a modo de tener un mejor ajuste de los datos, se aplicó un desfase de dos días para ajustar los tiempos de medición y cálculo.

Las figuras No.4.5.c) y No. 4.5.d) muestran la variación de línea de costa ajustado con dos días de desfase. Según la tabla de error, el resultado sí se encuentra dentro de los rangos mostrados en la tabla No.2.2, específicamente corresponde a Excelente, por lo que se concluye que el modelo es indicado para estos datos. También a partir de las figuras No.4.5.c) se puede decir que con un resultado de $R= 0,85$ los datos tienen una correlación positiva fuerte, según figura No.2.7., y la figura No. 4.5.d), muestra un mejor ajuste de los datos reales que en el caso de la figura No. 4.5.b) (ambos $\phi=50$ días), esto fue posible ya que se asumió un desfase de los primeros días, solo se utilizó este criterio con el fin de que los datos estén caracterizando la línea de costa medida. Se puede comentar que los parámetros de error siguen siendo lejanos a una buena correlación, pero comentar que existen mejores resultados para el caso donde se utiliza el factor erosivo *r móvil*.

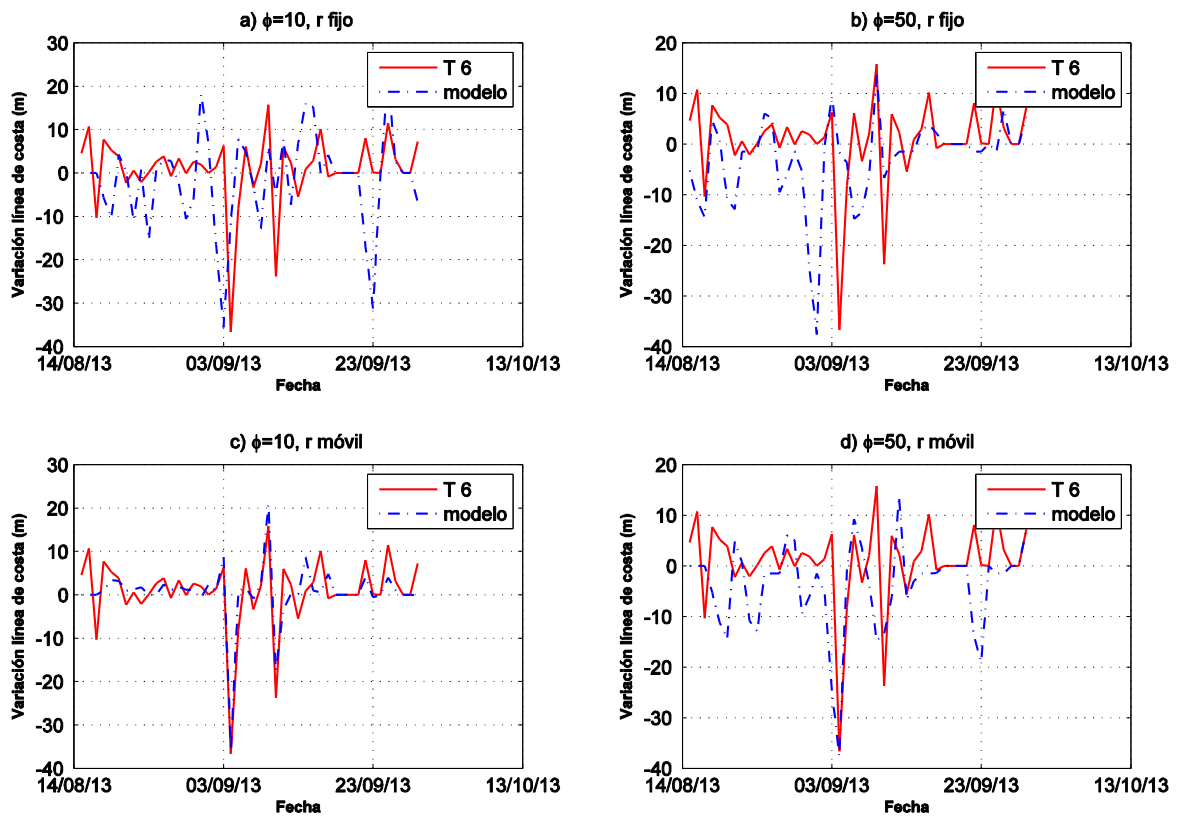


Figura 4.5: Resultado variación línea de costa, Transecto 6, análisis diario, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013

Tabla 4.2: Coeficientes y resultados del modelo transecto 6, análisis diario.

Transecto	ϕ (días)	b(m/s)	c(m ^{1.5} s ⁻¹ W ^{-0.5})	r	BSS	NMSE	R
6	10	0,2	0,00015	0,92	-1,62	2,57	0,11
6	50	-1,5	0,00016	0,88	-0,91	1,88	0,19
6	10	1	0,0005	r móvil	0,72	0,28	0,85
6	50	-1,5	0,00016	r móvil	-0,76	1,72	0,4

Caso 2: Transecto 2

La figura No.4.6. muestra los resultados de la variación de la línea de costa comparados con las mediciones del transecto 2, se expone un resumen con los parámetros de calibración del modelo utilizados para calcular esta variación, también se muestran los respectivos resultados de los parámetros de error (ver tabla 4.3).

De la figura No.4.6. se puede ver que ajustados a otros parámetros los resultados de los errores no tienen mucha variación con respecto a los resultados del transecto 6. Esto se observa en los parámetros BSS y NMSE que están considerados como resultados malos según tabla de error No. 2.2. También de las figuras No 4.6.c) y No 4.6.d) se observa que ajustados a otros parámetros los resultados del error son menores para el caso de parámetro erosión *r móvil*, esto se debe a que al tener un valor de *r* para cada día está considerando las características de ese mismo día, por lo tanto, no subestima el valor como el *r fijo* que es un valor promedio de todos los *r* del modelo.

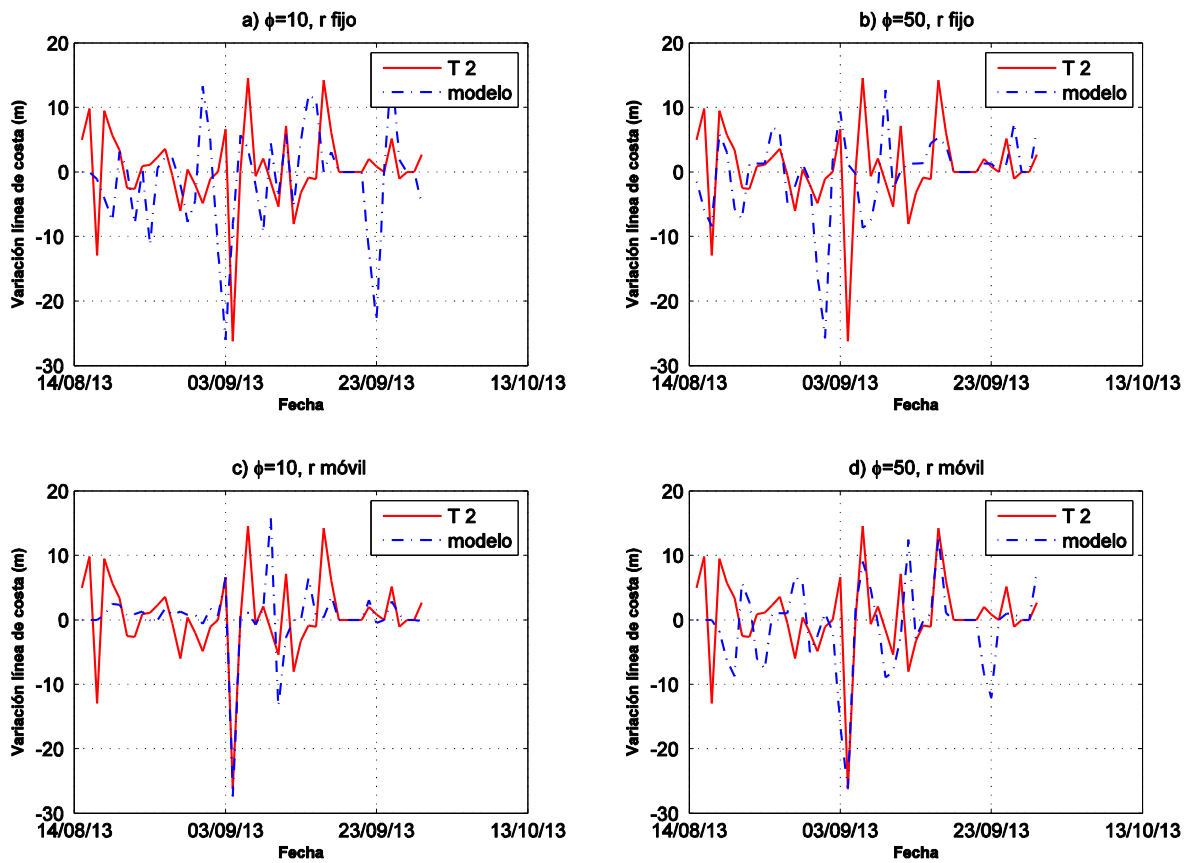


Figura 4.6: Resultado variación línea de costa, Transecto 2, análisis diario, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013

Tabla 4.3: Coeficientes y resultados del modelo transecto 2, análisis diario.

Transecto	ϕ (días)	b (m/s)	c ($m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5}$)	r	BSS	NMSE	R
2	10	0,2	0,00011	0,92	-1,58	2,57	0,04
2	50	1,3	0,00012	0,88	-0,7	1,68	0,14
2	10	0,7	0,00038	r móvil	0,23	0,76	0,57
2	50	1	0,00012	r móvil	-0,48	1,47	0,4

4.4.2. Análisis semanal

Calibración modelo semanal

Caso 1: Transecto 6

En la tabla No.4.4 se muestra un resumen con los parámetros de la calibración dependientes del modelo utilizados para el cálculo de variación de la línea de costa para una semana, también se muestran los respectivos resultados de los cálculos de error.

De las figuras No. 4.7.a) y No.4.7. b) donde se utiliza el parámetro de erosión *r fijo* y comparando con los resultados del cálculo de error (ver tabla No.2.2), se observa que no existe una aproximación buena del modelo, ya que según los métodos de error su resultado sería pobre, muy lejano a excelente. Además, se puede agregar que según figura No.4.7.a). y con un resultado de $R=0,2$ los datos tienen una correlación positiva débil, según lo indicado por la figura No. 2.7. También la figura No. 4.7.b), muestra que sí bien la línea de costa predicha por el modelo tiene una misma tendencia que los datos reales, no completamente estas líneas se reflejan al momento de conocer los parámetros del error, donde muestra valores muy lejanos a los que confirman un buen ajuste, ver tabla No. 4.4.

De las gráficas No. 4.7.c) y No.4.7. d), con el parámetro *r móvil* a cada semana, la línea del modelo se ajusta muy bien a los datos reales, como también lo indican los resultados de la tabla No. 4.4 que también confirma una buena correlación entre los datos.

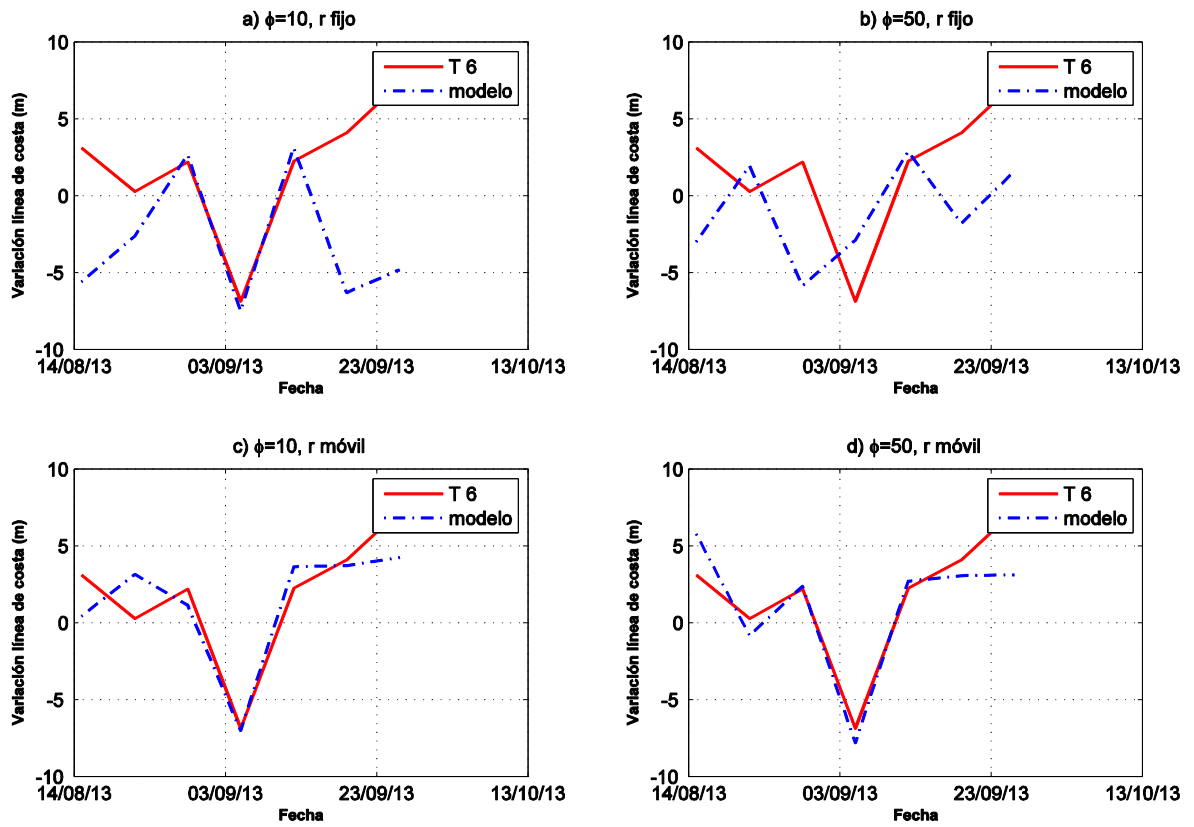


Figura 4.7: Resultado variación línea de costa, Transecto 6, análisis semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013

Tabla 4.4: Coeficientes y resultados del modelo transecto 6, análisis semanal.

Transecto	ϕ (días)	b (m/s)	c ($m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5}$)	r	BSS	NMSE	R
6	10	-3	0,00008	1,13	-2,37	2,48	0,2
6	50	-1	0,0000583	0,7	-0,87	1,37	0,26
6	10	0,3	0,00013	r móvil	0,73	0,2	0,88
6	50	3	0,01	r móvil	0,71	0,21	0,89

Caso 2: Transecto 2

En la siguiente figura se muestra resultados comparando con el transecto 2, se muestra un resumen con los parámetros de calibración del modelo utilizados para calcular la variación de la línea de costa, se muestran los respectivos resultados de los parámetros de error (ver tabla 4.5).

De las figuras No 4.8.a) y No 4.8.b) se puede ver que los resultados de los errores tienen un mayor error en la variación de la línea de costa para el parámetro de erosión *r fijo*.

Por otro lado, de las gráficas, No. 4.8.c) y No.4.8. d), con el parámetro *r móvil* a cada semana, la línea del modelo se ajusta muy bien a los datos reales, como también lo indican los resultados de la tabla No. 4.5 que confirma una buena correlación entre los datos. Calculando los parámetros del error de la tabla No.4.5 y comparado con la tabla No. 2.2, muestra que estos resultados están considerando el modelo con resultado Excelente.

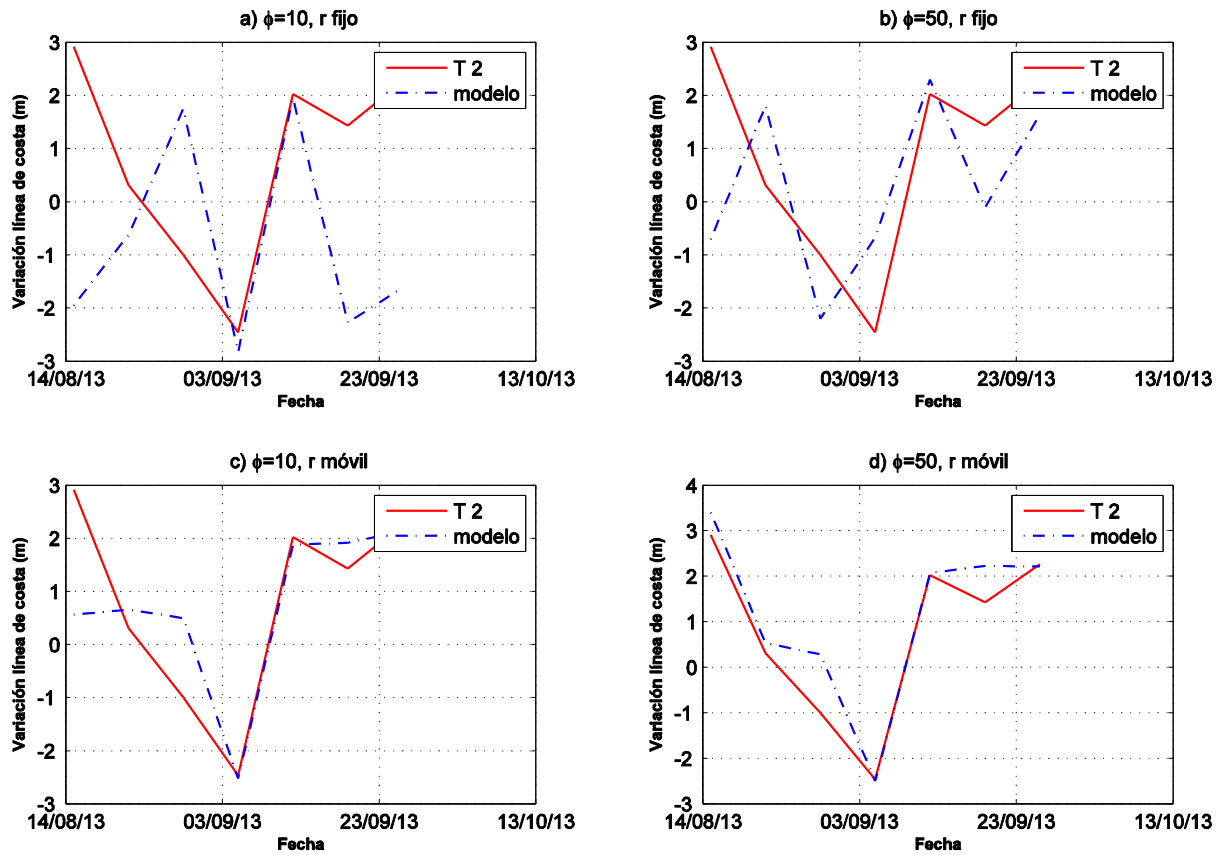


Figura 4.8: Resultado variación línea de costa, Transecto 2, análisis semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013

Tabla 4.5: Coeficientes y resultados del modelo transecto 2, análisis semanal

Transecto	ϕ (días)	b (m/s)	c ($m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5}$)	r	BSS	NMSE	R
2	10	-0,8	0,000036	1,13	-1,75	2,27	0,03
2	50	0,3	0,00003	0,7	-0,03	0,85	0,46
2	10	0,5	0,0000537	r móvil	0,63	0,3	0,8
2	50	2,2	0,00435	r móvil	0,88	0,1	0,97

4.4.3. Análisis Bi-semanal

Calibración del modelo Bi-semanal

Caso 1: Transecto 6

A continuación, se muestra el resultado de la variación de línea de costa, se exponen más adelante en la tabla No. 4.6. un resumen con los parámetros de calibración del modelo utilizados para dos semanas, también se muestran los respectivos resultados del cálculo de error. Según la gráfica No. 4.9.a) se observa que los resultados del modelo de variación de línea de costa para dos semanas con el parámetro *r fijo* para toda la semana, tiene una buena estimación, ya que según los errores se concluye como bueno, según tabla No 2.2. También el parámetro $R=0,92$ indica que los datos tienen una correlación positiva fuerte, según figura No. 2.9. No así la figura No. 4.9.b) donde existe una clara tendencia a la acreción de los datos, solo que en las últimas dos semanas este valor no refleja una acreción, sino una erosión, como se ve en la tabla No. 4.6, los resultados del parámetro de error, muestra un valor del parámetro BSS negativo, que indica una nula correlación, y el valor $R =0,87$ que representa una correlación pobre.

Según la figura No. 4.9.c) y con los resultados de los parámetros de cálculos del error, tabla No. 4.6, la variación del modelo con respecto a los datos reales para el caso de parámetro de erosión *r móvil* cada dos semanas, el modelo se ajusta “Bien” para el parámetro BSS y “Excelente” para el parámetro NMSE. Por lo tanto, el modelo si es capaz de caracterizar la línea de costa, el parámetro $R=0,87$ indica que los datos tienen una correlación positiva fuerte, según figura No. 2.7. De la figura No. 4.9.d), se puede apreciar que gracias al *r móvil* la línea de tendencia de los datos reales se acerca mucho a los puntos del modelo, también reflejan una acreción en los datos, el NMSE indica un valor excelente según tabla comparativa No. 2.2, y el BSS se encuentra en “Justo”, por lo tanto, los datos del modelo tienen una buena correlación con los datos reales.

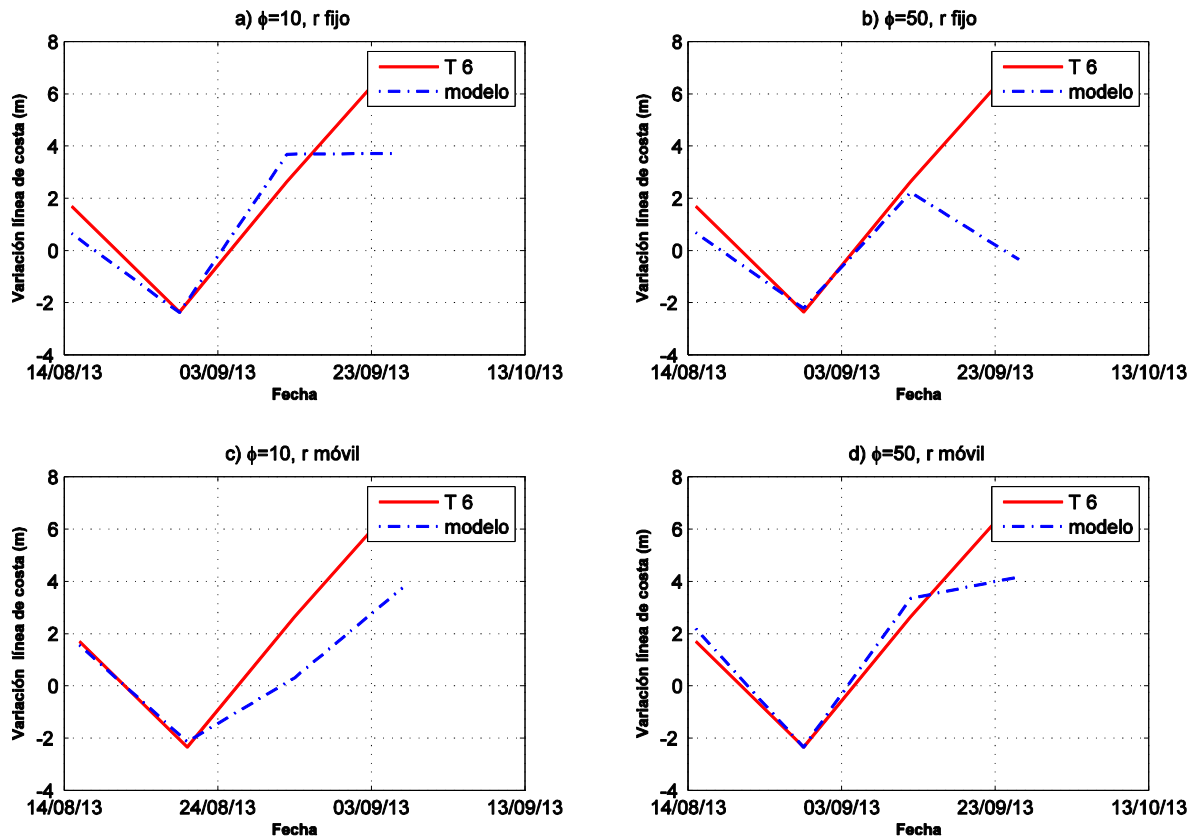


Figura 4.9: Resultado variación línea de costa, Transecto 6, análisis bi-semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013

Tabla 4.6: Coeficientes y resultados del modelo transecto 6, análisis bi-semanal.

Transecto	ϕ (días)	b(m/s)	$c(m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5})$	r	BSS	NMSE	R
6	10	0,18	0,0001	1,21	0,76	0,47	0,92
6	50	0,09	0,000038	0,77	-1,56	0,87	0,4
6	10	1,89	0,0016	r móvil	0,72	0,26	0,87
6	50	6	0,03	r móvil	0,55	0,15	0,91

Caso 2: Transecto 2

En la figura No.4.10. se muestra la gráfica de la variación de la línea de costa para el análisis bi-semanal con respecto a las medidas del transecto 2, también se muestra un resumen con los parámetros de calibración del modelo utilizados de línea de costa para dos semanas, en la tabla No.4.7. se ven los resultados del error.

De las figuras No 4.10.a) y No 4.10.b) se puede ver que los resultados del error son menores para el caso de parámetro erosión *r móvil* para dos semanas, comparado con el *r fijo* donde sí existe mayor error en los resultados. También de las figuras No 4.10.c) y No 4.10.d) se puede ver que con el parámetro de erosión *r móvil* para dos semanas, los resultados de los errores, ver tabla No. 4.7, no tienen mucha variación con respecto a los resultados del transecto 6, pero sí existe un mayor ajuste en el caso de $\phi=50$ días, por lo que en general se puede comentar que los datos del modelo tienen una buena correlación con los datos reales.

Comentar que, por lo visto en todos los análisis del modelo, el *r móvil* entrega mejores valores de error que el *r fijo*, lo que se explica ya que el primero está calculado tomando en cuenta el valor del parámetro de erosión *r* de cada día/semana/dos semanas, esto significa que cada valor de *r* está caracterizando a su respectivo día/semana/dos semanas y así varía para el caso siguiente, no así el *r fijo* que se calcula según un promedio de todos los *r* encontrados en cada análisis.

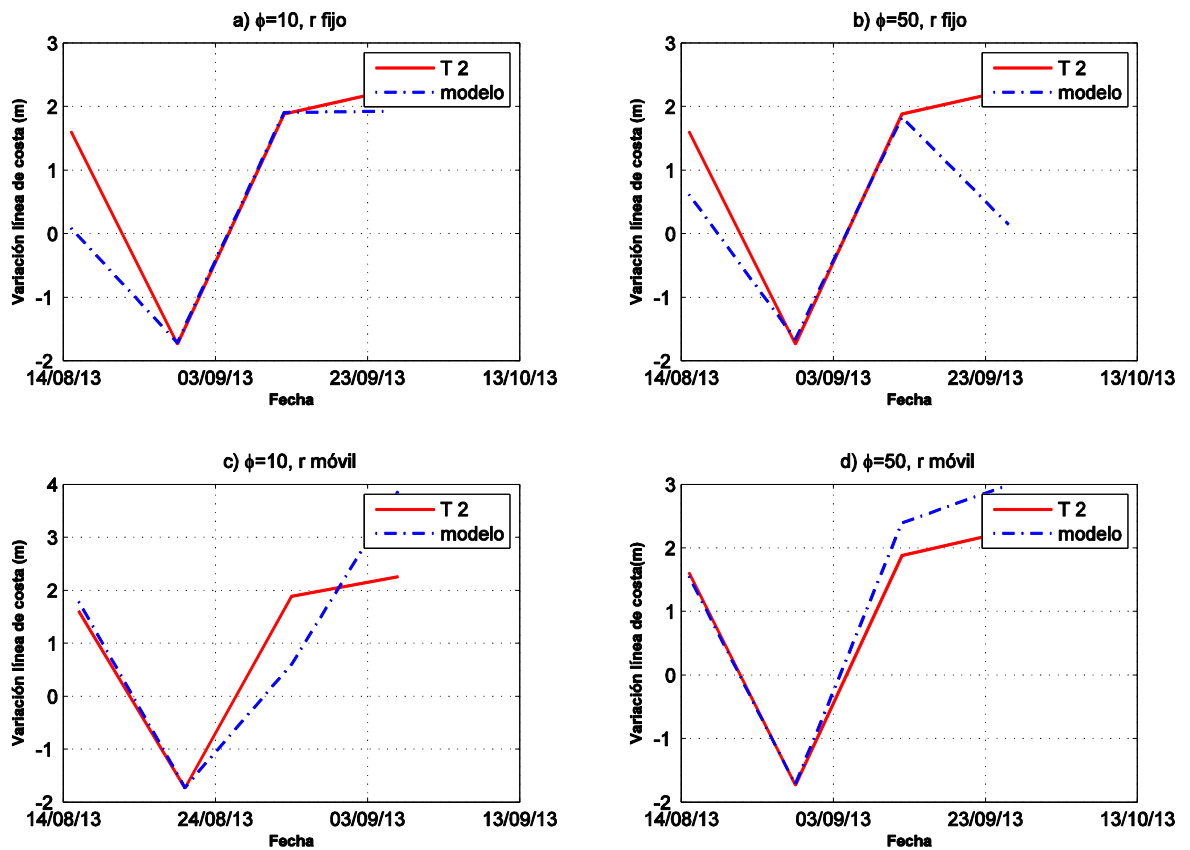


Figura 4.10: Resultado variación línea de costa, Transecto 2, análisis bi-semanal, $\phi=10$ y $\phi=50$, desde 15/08/2013-30/09/2013

Tabla 4.7: Coeficientes y resultados del modelo transecto 2, análisis bi-semanal

Transecto	ϕ (días)	b(m/s)	$c(m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5})$	r	BSS	NMSE	R
2	10	0,12	0,00006	1,21	0,72	0,17	0,92
2	50	0,15	0,00003	0,77	0,37	0,38	0,84
2	10	2,1	0,0015	r móvil	0,51	0,3	0,87
2	50	4,3	0,0216	r móvil	0,91	0,05	0,99

Como resumen en el anexo 2, se muestran tablas de los resultados obtenidos para los transectos 2 y 6 a través del modelo utilizado en esta tesis, se muestra un resumen de los parámetros utilizados para graficar las distintas variaciones de la línea de costa.

A modo resumen, gracias a los resultados obtenidos del modelo propuesto, se observa claramente que los resultados de los parámetros de error para el caso con factor de erosión *r fijo* para todo el set de datos, el error es mayor y sus resultados no son buenos. Comparado con el parámetro *r móvil* para cada dato, los resultados tienen una notoria mejora, demostrando ser buenos y señalando bajo error en los datos. Como se nota en la figura No. 5.1, donde las barras verdes de los parámetros BSS, NMSE y R se acercan a los valores ideales de la tabla No. 2.2 y figura No. 2.7.

De la figura No.4.4. se nota que para el caso donde los valores de *r móvil* corresponden a la líneas verdes y magenta en las figuras: No. 4.4.a), No. 4.4.b) y No. 4.4.c), (barras moradas en figura No. 5.1), estos arrojan buenos resultados, indicando, que los valores de los parámetros de error para la variación de la línea de costa son buenos, casi excelentes, por otro lado, para el caso donde el valor de *r fijo* es igual para toda la sección de datos, línea punteada azul y línea roja en las figuras: No. 4.4.a), No. 4.4.b) y No. 4.4.c) los resultados de los parámetros del error son malos o deficientes. Por lo que se puede inferir que para el caso donde las escalas de tiempo son pequeñas, días semanas y meses, es preferible usar el parámetro erosivo *r móvil* ajustado a cada día.

4.5. Predicción del modelo

En esta sección se mostrará muy resumidamente algunas predicciones hechas con el modelo *ShoreFor* calibrado para la localidad de estudio y para diferentes variaciones temporales analizadas, se estudiarán las predicciones para el caso de días, semanas y dos semanas, esto con el fin de apreciar de mejor manera si el modelo es capaz de mostrar acreción o erosión en la línea de costa.

4.5.1. Predicción diaria

En la tabla No. 4.8 se muestra los coeficientes del modelo utilizados para la predicción de los datos diarios, la fecha de predicción es desde 01/10/2013-01/11/2013.

La figura No. 4.11 se observa el resultado de la variación de línea de costa obtenidos con el parámetro de erosión *r móvil* para la predicción de los datos desde final de septiembre a primeros días de noviembre, de esta figura se observa que los datos muestran una tendencia lineal positiva, comprobando la acreción en la zona litoral.

Tabla 4.8: Coeficientes usados para predicción del modelo caso días.

ϕ (días)	r	b (m/s)	$c(m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5})$
10	r móvil	0,7	0,0009

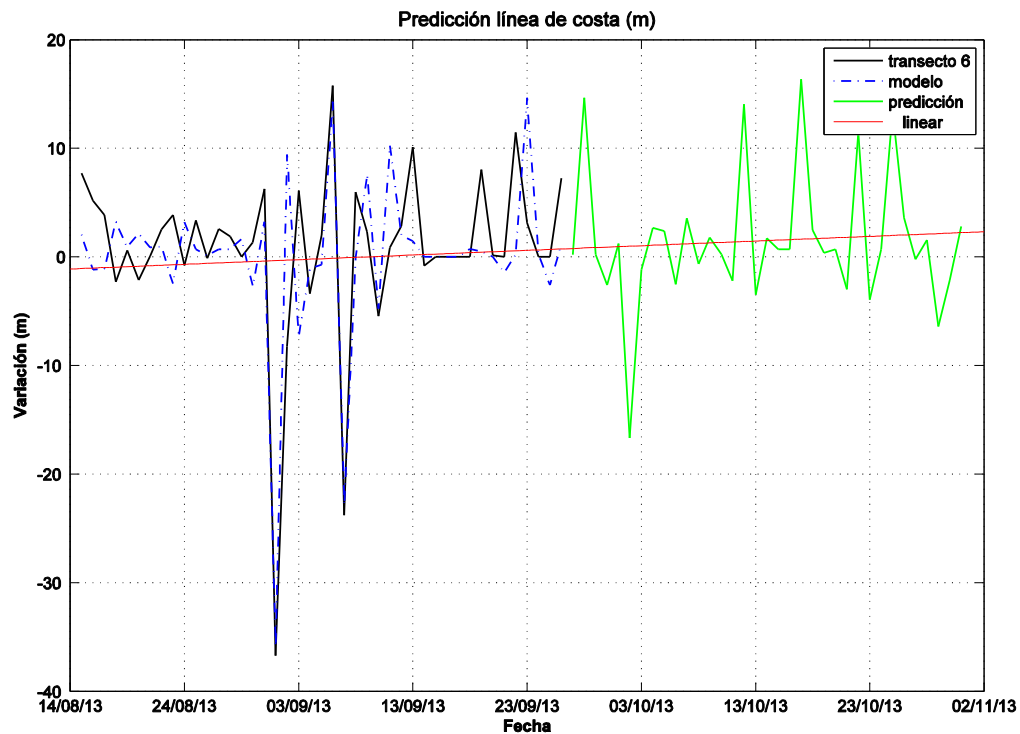


Figura 4.11: Predicción del modelo para el análisis diario desde 15/08/2013-01/11/2013.

4.5.2. Predicción semanal

A continuación, se mostrará una gráfica de la predicción de la línea de costa en semanas, en la tabla No. 4.9, se observan los parámetros de calibración.

Tabla 4.9: Coeficientes usados para predicción del modelo análisis semanal.

ϕ (días)	r	b(m/s)	c ($m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5}$)
10	r móvil	0,5	0,00005537

La fecha correspondiente a estos datos es desde el 15/08/2013 hasta 05/12/2013.

De la figura No. 4.12, se puede apreciar que durante las primeras siete semanas (semanas que se tiene datos reales para comparar) existe una marcada variación entre sucesos de acreción y erosión, esto lo podemos asociar a que, durante esta fecha, agosto, suceden variados procesos de aumento en oleaje debido a tormentas asociadas al clima de invierno.

Más adelante, en las semanas donde no existen datos para comparar, se aprecia una línea de tendencia positiva, que estaría indicando acreción de la línea de costa, observando datos localizados que se experimentan cuando ocurre alguna tormenta.

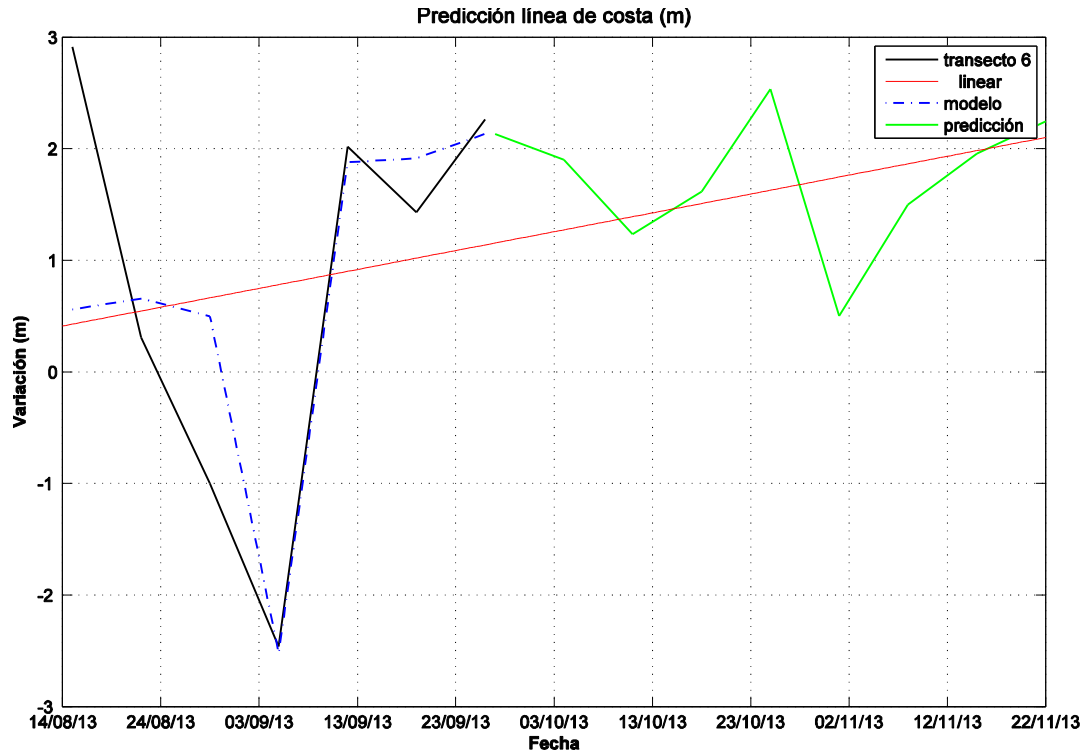


Figura 4.12: Predicción del modelo para análisis semanal desde 15/08/2013-05/12/2013.

4.5.3. Predicción bi-semanal

A continuación, se mostrará una gráfica de la predicción de la línea de costa para dos semanas, en la tabla No. 4.10, se observan los parámetros de calibración.

Tabla 4.10: Coeficientes usados para predicción del modelo análisis bi-semanal.

ϕ (días)	r	b(m/s)	c ($m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5}$)
10	r móvil	2,1	0,0015

El grafico No. 4.13. muestra la predicción de la línea de costa desde la fecha 29/09/2013 al 19/12/2013, aquí apreciamos igual que en la predicción anterior, una línea de

tendencia positiva, por lo que también se puede hablar que existiría una acreción en la zona litoral.

También se puede acotar que luego de los meses de tormenta, agosto y septiembre, los datos del modelo comienzan a estabilizarse, sin cambios notorios que podrían experimentarse en una tormenta. Debido a esto desde octubre hasta fines de diciembre la línea de tendencia se mantiene solo apreciando una posible acreción en la zona.

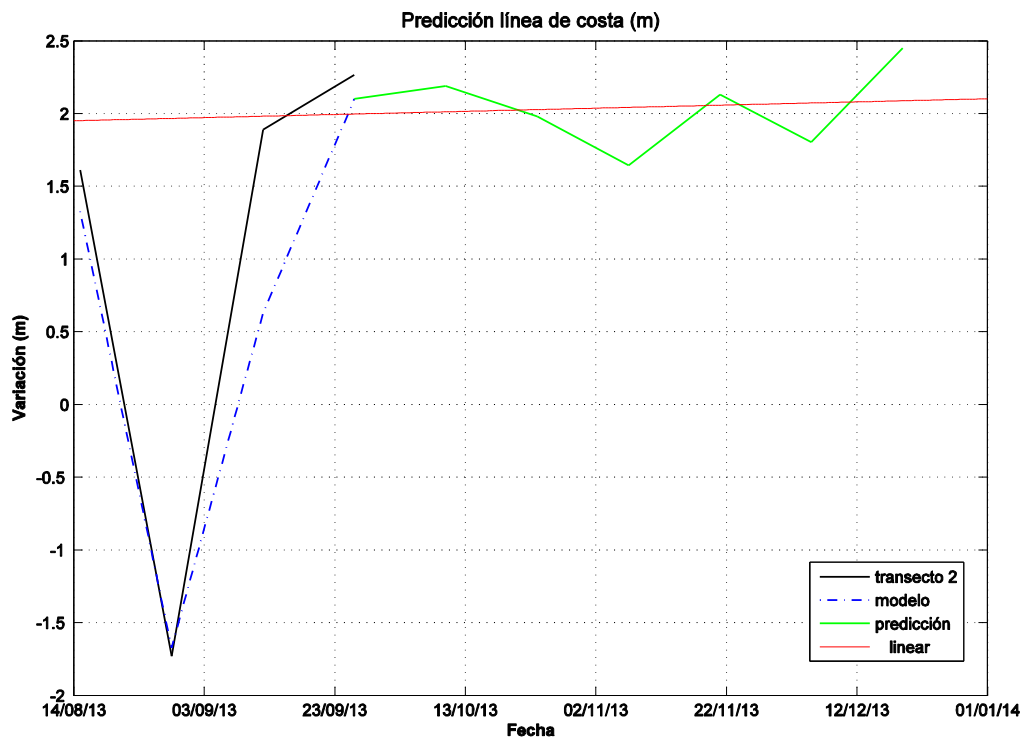


Figura 4.13: Predicción del modelo para análisis bi-semanal desde 15/08/2013-19/012/2013.

5. Capítulo V. Discusión y conclusiones

5.1. Discusión

Al realizar la comparación para los transectos 2 y 6, los resultados de las distintas gráficas y sus respectivas tablas indican que existe menor error para el caso del transecto 2, ver figura No. 5.1, que muestra mayor cantidad de barras verdes, las que exponen un buen ajuste a los datos reales. Este resultado favorable para el transecto 2 se explica gracias a que la resolución espacial de la imagen desde donde fueron estimadas las variaciones de la línea de costa es mayor.

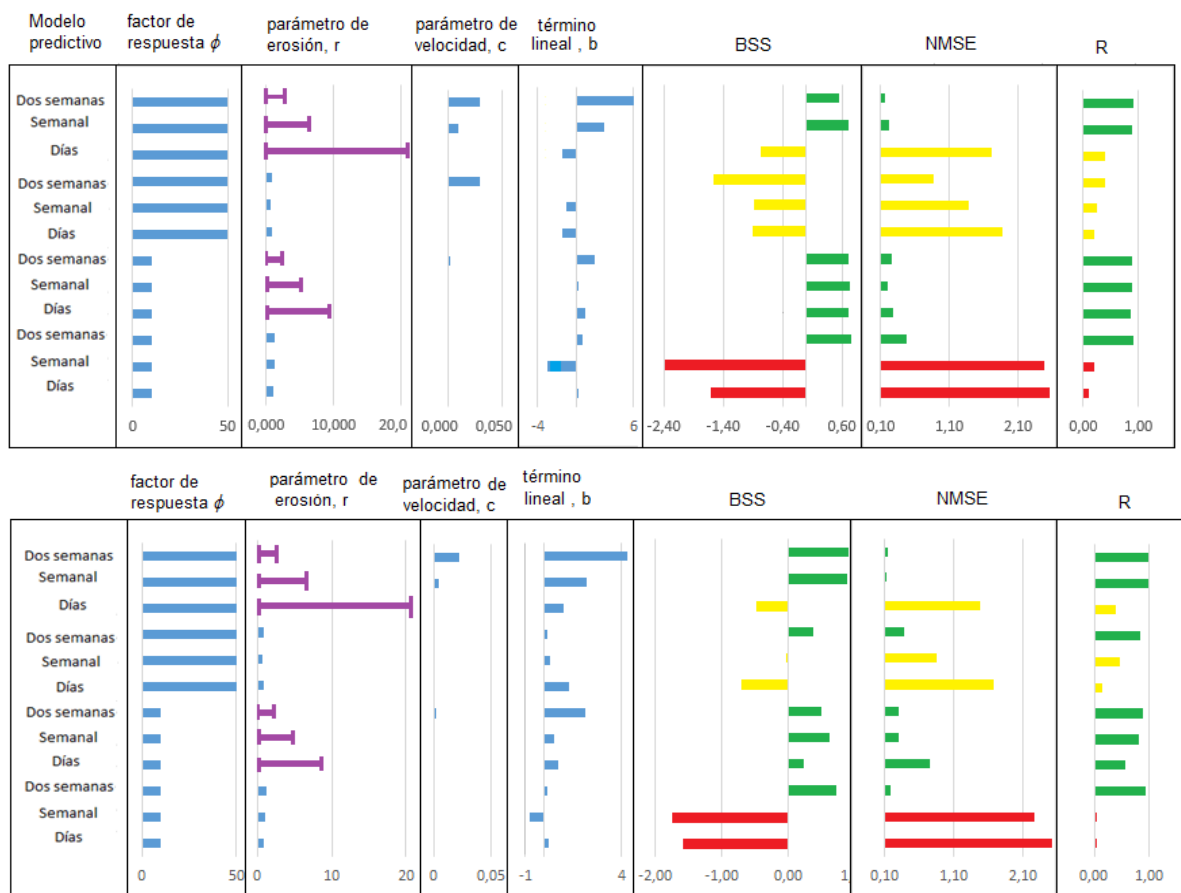


Figura 5.1: Resumen de los estadísticos de los ensayos del modelo a corto plazo. Paneles de izquierda a derecha: factor de respuesta (ϕ), erosión (r), parámetro de velocidad (c), término lineal (b), Brier Skill Score (BSS), error cuadrático medio normalizado (NMSE), modelo de correlación (R). Panel superior: modelo predictivo para transecto 6. Panel inferior: modelo predictivo para transecto 2. Color rojo indican malos resultados, color amarillo resultados medios, verde indica buenos resultados.

A partir de los resultados expuestos del capítulo 4 en esta tesis y comparando con los resultados de la variación de la línea de costa, se demostró que el modelo estudiado es una buena aproximación para la variación de la línea de costa, más aún, el modelo fue capaz de capturar las variaciones de la línea de costa ocurridas en escalas temporales cortas. Esto se aprecia claramente al momento de hacer las comparaciones entre los datos reales y los entregados por el modelo, donde los datos reales tienen una clara tendencia a la acreción, pero también detectando condiciones altamente erosivas inducidas por tormentas puntuales ocurridas durante el periodo de estudio.

Según Splinter et al., 2014, el modelo no fue capaz de capturar de buena forma los eventos de acreción y erosión. Entendiendo que en su caso el modelo fue calibrado a una escala mensual (o punto por mes), es esperable que sus parámetros de calibración, así como la forma de estimar el factor de erosión r no tuviera la suficiente resolución para capturar las fluctuaciones bruscas "spikes" asociados a eventos energéticamente importantes, pero de poca duración. Más aún, la subestimación de la erosión en el modelo de Splinter et al., 2014., durante algunos eventos puede ser atribuido a una mala estimación del factor de erosión r al considerarlo fijo.

En la figura No. 4.5.b), existe un desfase de algunos días entre los primeros puntos, esto se puede atribuir a que estas diferencias se produjeron debido a que las horas de medición de los transectos estaban desfasadas con respecto a la hora de inicio con lo cual se trabajó en el modelo, por un desfase generado por la propagación del oleaje y un desfase asociado al momento de medición.

Adicionalmente, el modelo tubo una marcada mejoría, cuando se modificó la forma de calcular el factor de erosión r en relación a la forma originalmente planteada por Davidson et al., 2013. Al establecer un valor de r móvil que se adecuaba a cada condición y cambio en las condiciones de oleaje, fue posible capturar de mejor forma la incidencia de esos cambios en las variaciones de la línea de costa. Esto se aprecia en la figura No. 4.5.a) donde se observa puntos con elevaciones y disminuciones, pero en los momentos donde no hay aumentos, tanto

en acreción o erosión, el parámetro *r fijo* para todos los datos, no expreso con exactitud la variación en la línea de costa. En cambio, la figura No. 4.5.c), si bien, muestra y destaca claramente los momentos de erosión y acreción producidos por algún evento de tormenta, también muestra con exactitud los momentos más estables en la línea de costa, ya que para este caso el parámetro erosivo *r móvil* cambiaba de valor según el día. Es por esto que se puede dar como opción que al momento de utilizar este modelo realizar ambos cálculos del parámetro de erosión, ya que si bien, para ambos casos, la línea de tendencia indicaba acreción, una es más exacta con respecto a la otra al momento de reproducir fechas donde no existe eventos como tormentas u oleaje predominante.

Otro aspecto a considerar, es que al utilizar este modelo y ver los resultados obtenidos, se puede decir que sí está cumpliéndose la hipótesis propuesta en esta tesis, donde se esperaba caracterizar la línea de costa a través de un modelo que fuera capaz de reproducir un aumento o disminución en la línea litoral.

También apreciar que, de los resultados obtenidos a través del modelo, y comparado con los datos reales obtenidos a través de los transectos, estos mostraban siempre una tendencia a la acreción de la línea costera, y así también, la línea del modelo que siempre fue caracterizando la línea de costa en este mismo sentido, hacia una acreción en la playa, como concluye Cienfuegos et al, 2014, que los transectos indicaron acreción en la zona de la desembocadura del Río Mataquito.

Por otro lado, Davidson en su documento indicó que sus resultados demostraron mejoras significativas en las predicciones de línea de costa en escalas de tiempo de varios años, como se muestra en la figura No.5.2. En este trabajo se implementó el mismo modelo, pero bajo escalas temporales mucho menor para lo cual se debió ajustar los parámetros de calibración en forma importante, se ve en la figura No. 5.3, que para calibrar el modelo el factor de respuesta ϕ es apreciablemente mayor (hasta $\phi=1000$ días) para el caso de las costas expuestas (igual que la playa del Mataquito), en cambio en el caso para esta tesis con escala menor el ϕ se mantuvo entre 10 y 50 días. De esta misma figura se puede comparar el

parámetro de erosión r , que para el caso de escala temporal a largo plazo sus valores fluctúan entre (0.2;0.55), y para el caso de esta tesis los valores r móvil variaron entre (0.05;21.7), por lo que se puede decir que en casos de escalas menores se debe tener presente que realizar el cálculo de r móvil ayudaría mucho al momento de calibrar el modelo. También comentar que el parámetro de velocidad c , para el caso de escala anual es mucho menor que el caso de esta tesis. No así el caso del término lineal b , que para ambas escalas sus valores están dentro de los mismos rangos (-3;5).

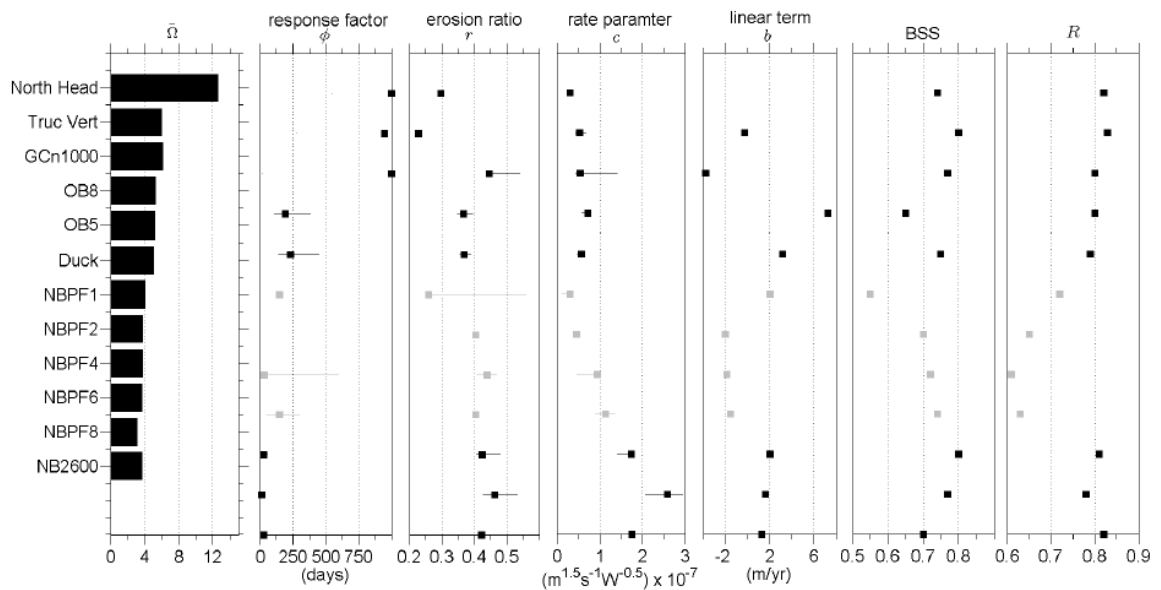


Figura 5.2: Resumen de las estadísticas de todos los ensayos del modelo a largo plazo. Gris indica que el modelo no se considera significativamente lo suficiente como para ser incluido en el análisis adicional. Las líneas horizontales indican el rango del coeficiente donde R^2 no disminuyó en más de un 10% del máximo. Paneles de izquierda a derecha: media de velocidad de caída adimensional ($\bar{\Omega}$); factor de respuesta (ϕ); relación de la erosión (r); parámetro de velocidad (c); término lineal (b); modelo Brier Score (BSS); y el modelo de correlación (R). Splinter et al., 2014.

A modo de tener una mejor visión de los parámetros utilizados por Splinter (2014) y los aplicados al modelo de esta tesis, se muestra la figura No.5.3.

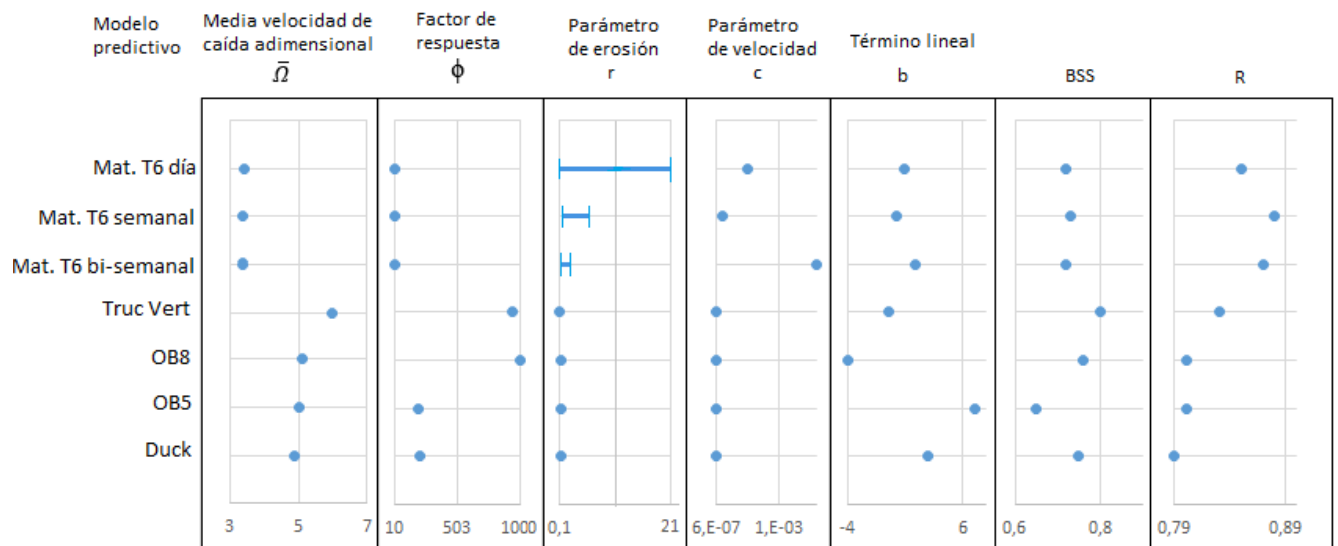


Figura 5.3: Resumen resultados modelo propuesto para playa Mataquito comparado con resultados reales de playas similares de Splinter et al.,2014.

Cabe mencionar que para el diseño de la variación de la playa se debió utilizar el factor de respuesta ϕ (días), el cual se indica en tabla No. 4.1, este muestra que a medida que el valor de ϕ aumenta, menor es la variación del resultado de Ω_{eq} , quedando demostrado en el valor de la desviación estándar, que al tener un valor de factor de respuesta bajo los datos se alejan del promedio de los Ω_{eq} y por el contrario al aumentar el factor ϕ , cada vez existía menos variación en los datos, y se acercaban al promedio de Ω_{eq} . Es por esto que al momento de la elección de este factor de respuesta se escogió un valor bajo de días y uno medio, $\phi=10$ y $\phi=50$, respectivamente.

Basándose en el párrafo anterior, se puede indicar que el modelo tiene una buena caracterización de la línea de costa en escalas de tiempo menores (días, semanas), por lo que se invita a seguir trabajando en obtener más demostraciones de este modelo para estas escalas.

Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo “*ShoreFor*”, no solo es capaz de predecir variaciones de la línea de costa a escalas de mayor plazo, años y décadas, sino que también es posible utilizarlo en escalas de menor plazo, como semanas y meses.

Una limitación a considerar en el modelo aplicado en esta tesis, es que se debe tener en cuenta que existen horas de desfase entre la toma de datos por los transectos y la hora de llegada de estos a la línea de costa, por lo que, es necesario utilizar datos de altura, periodo y dirección, considerando la misma hora de inicio que la de los transectos, esto con el fin de disminuir el desfase al momento de graficar resultados.

Con respecto a la calidad de los datos de entrada en el modelo, estos afectan los resultados de modelación y es probable que bajo ciertas condiciones se subestime o sobrestimen las características del oleaje, lo que redundará directamente en la calidad de la predicción que realice el modelo y que está completamente fuera del alcance de la calibración, es superar esos errores. Lo anterior resalta la necesidad de contar con una buena base de datos y una correcta caracterización del clima de oleaje.

Del total de datos de la figura No. 5.1, aproximadamente el 60% de estos obtuvieron resultados desde buenos a excelentes y solo el 40% de los resultados fueron malos o pobres, notándose en la mayor cantidad de barras verdes, que indican valores óptimos, esto no quiere decir que el modelo no sirve, sino que, sólo este rechazo se debe al desfase de tiempo antes mencionado. Porque en ambos casos, la hipótesis de conocer si el modelo es capaz de predecir una línea costera sí estaría produciéndose para ambos resultados, recordar que en ambos casos las líneas de tendencias varían hacia una acreción de la línea de costa.

5.2. Conclusiones

Para finalizar, basándose en el capítulo de resultados obtenidos en esta tesis y corroborando que se cumpliera el objetivo general de este informe, que es, conocer si es posible que el modelo caracterice una zona litoral demostrando erosión o acreción, fue posible concluir que este modelo de variación de la línea de costa a través de un modelo propuesto por los autores del documento Davidson et al., 2013 y Splinter et al. 2014, sí es capaz de representar esta línea de tendencia, demostrando que existe una acreción durante la fecha de toma de datos, además, tiene una buena aproximación a los datos reales obtenidos gracias a los transectos, demostrando que, aunque el modelo este hecho para escalas de tiempo a largo plazo, en el caso de esta tesis, donde la escala de tiempo fueron mucho menos, de incluso días, el modelo tuvo un buen resultado y cumple con los objetivos propuestos.

El modelo utilizado en esta tesis, modelo *ShoreFor* (Davidson et al., 2013) resultó ser una herramienta muy útil para conocer los distintos fenómenos a los que puede estar expuesta una playa, para obtener predicciones de la evolución temporal tanto a corto plazo como a largo plazo, y así conocer y caracterizar una playa según su morfodinámica. Como queda demostrado en la figura No.5.3, donde se observa que, para el caso de las playas expuestas (Mataquito) y teniendo en cuenta el tamaño de sedimento (las playas: Truc Vert, Duck, Ocean Beach, figura No.5.2), sus resultados de error son similares a los obtenidos en la figura No. 5.1, y para ambos sus resultados son buenos, por lo que el modelo funciona tanto para escalas temporales a corto y largo plazo.

También es destacable que el utilizar un estudio de variación de línea de costa a través de este modelo permite conocer el impacto que puede provocar la energía de la ola sobre una construcción de ingeniería alrededor de la zona litoral, siendo esto, de gran ayuda al momento de planear tanto costos en dinero y como no decirlo, daños a la edificación y daños a personas. Igualmente sirve para identificar la zona de influencia del oleaje y puede determinar la

localización de infraestructura en la costa, por ejemplo, muros, edificaciones, protecciones costeras, etc.

De los resultados obtenidos en esta tesis, como lo indica la tabla No. 4.4, el modelo es capaz de mostrar variaciones de la línea de costa con parámetros de error muy bajos, por lo que se puede afirmar que estos resultados son creíbles y, por lo tanto, llevado a la zona en estudio, se afirma que, durante los meses de agosto a septiembre del año 2013, la zona litoral de la desembocadura del Río Mataquito se encuentra en un proceso de acreción de sedimentos debido a la acción del oleaje.

Señalar que de acuerdo a la figura No.5.1 el término lineal b es de valores muy pequeños, por lo que su contribución a la variación es baja, lo que permite concluir que los cambios y las tendencias observadas por el modelo corresponden principalmente a fenómenos inducidos por los cambios en las condiciones del oleaje. De esta misma figura, se observa claramente que los valores de error son menores al usar el parámetro de erosión r móvil, notándose en las barras verdes que indica parámetros de error como el R cercanos a 1, para el caso del BSS valores mayores a 0,6 y del parámetro NMSE menores a 0,3, comprobando lo expuesto en Splinter et al., 2014, tabla No.2.2.

Por otro lado, con respecto al parámetro erosivo r , donde en esta tesis se calculó un r fijo para toda la extensión de datos, y el otro caso, calculando un r móvil para cada día de la extensión de datos, se puede decir, que este valor es de gran importancia al momento de ver el error, ya que, con los distintos valores de r móvil, los errores disminuyen mucho acercándose a valores buenos o excelentes. No así con un valor r fijo, donde los parámetros de error eran lejanos y pobres. Se recomienda para escalas de tiempo pequeñas analizar la variación de línea de costa haciendo ambos métodos, y conociendo su error obtener un resultado de acuerdo a las tablas de parámetros de error, para finalmente concluir si es adecuado ese método.

Por último, es importante concluir que, con respecto a la calidad de la información ingresada al modelo, los datos de oleaje, deben corresponder a datos concisos y reales que estén mostrando la variación del oleaje, como en este caso de utilizó el modelo WAVEWATCHIII, el cual permite obtener datos de oleaje en playas y puntos que no se encuentran con estaciones de mediciones o no se tiene información de su comportamiento mensual. Por lo tanto, se puede inferir que no se está trabajando con características del clima de oleaje de certera claridad, afectando en los resultados entregados por el modelo. También agregar que, el cálculo de estimación de la rompiente se evaluó según un parámetro de rompimiento, $\gamma_b = 0,78$, el cual puede afectar la predicción de la variación costera por ser muy aproximados.

6. Capítulo VI. Referencias

Almar, R., Ranasinghe, R., Sénéchal, N., Bonneton, P., Roelvink, D., Bryan, K. R., ... & Parisot, J. P., (2012). Video-Based Detection of Shorelines at Complex Meso-Macro Tidal Beaches. *Journal of Coastal Research*, 28(5), 1040-1048.

Aubrey, D. G. (1979), Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement, *Journal of Geophysical Research*, 84, 6347-6354.

Antonio Lechuga Álvaro, (2002). El uso del espacio litoral: Infraestructuras y playas, I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Libro de Territorio y Medio Ambiente Congreso de Ingeniería Civil, Madrid.

Armaroli, C., Ciavola, P., (2011). Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: a video-based morphological classification. *Geomorphology*, 126, 201–216.

Bardají, T., Zazo, C., Cabrero, A. Dabrio, C.J., Goy, J.L., Lario, J. Y Silva, (2009). G. Impacto del cambio climático en el litoral. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), p. 141-154.

Bird, E. C. F. (1985). *Coastline Changes*. Nueva York: Wiley & Sons.

Boak E. H. and Turner I. L.,(2005). Shoreline Definition and Detection: A Review, July, *Journal of Coastal Research(JCR)* , Vol. 21, No. 4, , West Palm Beach, Florida

Carley, J. T., I. L. Turner, E. D. Couriel, L. A. Jackson, and J. E. McGrath (1999), The practical application of four commercially available numerical beach morphology models on a high energy coastline, in *Proceedings of the Australian Coastal and Ocean Engineering Conference*, pp. 101-106, Perth, AU.

Carter, R.W.G. (1988). Coastal environments and introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. London; New York: Academic Press. 617 p.

Castro C., Morales E., (2006). E. La Zona Costera. Medio Natural y Ordenación Integrada. Instituto de Geografía (PUC)- Serie Geolibros.

Cienfuegos R., Villagran M. ,Aguilera J.C., Catalán P., Castelle B., Almar R., (2014). Video monitoring and field measurements of a rapidly evolving coastal system: the river mouth and sand spit of the Mataquito River in Chile. In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70, pp. 639-644, ISSN 0749-0208.

Clarke, D., and I. Eliot (1988), Low-frequency changes of sediment volume on the beach face at Warilla Beach, New South Wales, 1975{1985, Marine Geology, 79, 189 - 211, doi:10.1016/0025-3227(88)90039-4.

Davidson, M. A., and I. L. Turner (2009), A behavioral template beach profile model for predicting seasonal to interannual shoreline evolution, Journal of Geophysical Research, 114, F01,020, doi:10.1029/2007JF000888.

Davidson, M. A., R. P. Lewis, and I. L. Turner (2010), Forecasting seasonal to multi-year shoreline change, Coastal Engineering, 57, 620-629, doi:10.1016/j.coastaleng.2010.02. 001.

Davidson, M. A., K. D. Splinter, and I. L. Turner (2013), A simple equilibrium model for predicting shoreline change, Coastal Engineering, 73, 191-202,

Doody, P., M. Ferreira, S. Lombardo, I. Lucius, R. Misdorp, H. Niesing, A. Salman, M. Smallegange, J. Sierra, E. Roca, P. Fernández y C. Pérez. (2005). Vivir la erosión costera en Europa: Sedimentos y espacios para la sostenibilidad. Comisión Europea, Luxemburgo. 40p.

Freire, P., Taborda, R., Bertin, X., Guerreiro, M., Fortunato, A. B., Silva, A. M., Andrade, C., Oliveira, A., Antunes, C., Freitas, M. C., Nahon, A., Rodrigues, M. and Bruneau, N., (2011). Medium-term morphodynamic evolution of a small coastal inlet. *J. Coastal Research*, S.I. 64, 666-670. Szczecin, Poland

Geología, Dinámica Litoral, www.rutageologica.cl

Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Diciembre (2004). Diagnóstico y Clasificación de los Recursos y Cuerpos de agua según objetivos de Calidad Cuenca Rio Mataquito.

Guzmán, W., B.O. Posada, G. Guzmán y D. Morales. (2008). Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia – PNIEC – Plan de Acción 2009 – 2019. Invemar, Santa Marta. 72 p.

Hansen, J. E., and Barnard P. L. (2010), Sub-weekly to interannual variability of a high energy shoreline, *Coastal Engineering*, 57, 959-972, doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.05. 011.

Hanson, H., and N. Kraus (1989), Generalized model for simulating shoreline change, Report 1, Technical Reference, Tech. rep., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station; Coastal Engineering Research Center (U.S.); United States. Army. Corps of Engineers.

Hattersley R.T.; Foster D.N., (1968). "Problems of beach erosion and some solutions". *Australian Civil Engineering*. Vol 9. August

Komar, P. D. (1974), *Beach Processes and Sedimentation*, Prentice-Hall, Englewood

Kokot, R. 2004. Erosión de la zona patagónica por cambio climático. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 59 (4): 715–726.

Iriondo M. H., (2006). *Introducción a la Geología*, Editorial Brujas 3° edición, Córdoba Argentina.

Martínez C. y Salinas S., (2009), *Morfodinámica y evolución reciente de playa Tunquén, Chile central*, *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 44(1): 203-215, abril de 2009

Masselink G. and Short A. D. (1993), *The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model*, *Journal of Coastal Research*, 9 (3), 785-800.

McCall, R., J. Van Thiel de Vries, N. Plant, A. Van Dongeren, J. Roelvink, D. Thompson, and A. Reniers (2010), *Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island*, *Coastal En*, 57, 668-683

Miller, J. K., and R. G. Dean (2004a), *A simple new shoreline change model*, *Coastal Engineering*, 51, 531-56.

Miller, J. K., and R. G. Dean (2004b), *A simple new shoreline evolution model*, in *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, vol. 2, edited by J. M. Smith, pp. 2009-2021, ASCE, World Scientific

Morris B., Davidson M. and Huntley D. (2001). *Measurements of the response of a coastal inlet using video monitoring techniques*. *Marine Geology* 175, 251-272.

Morris D., Coco G., Bryan, K. and Turner I., (2007). *Video-derived mapping of estuarine evolution*. *J. Coastal Research*, S.I. 50, 410-414.

Larson, M., and N. Kraus (1989), *SBEACH: Numerical model for simulating storm induced beach change; Report 1, Empirical foundation and model development*, Tech. Rep. CERC 89-9, Coastal Engineering Research Center.

Oceanografía Física, (2009), Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.

Paterson A., Hume T., and Healy T. (2001). River Mouth Morphodynamics on a Mixed Sand-Gravel Coast. *J. Coastal Research* S.I. 34, 288 – 294.

Pelnard-Considere, R. (1956), Essai de theorie do l'evolution des forms de ravage en plage de sable et de galets, 4me Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III (Rapport No. 1), 289-298.

Plant, N.G., Aarninhof, S.G.J., Turner, I.L. and Kingston, K.S., (2007). The performance of shoreline detection models applied to video imagery. *Journal of Coastal Research*, 23(3), 658-670.

Posada, B. O y W. Henao. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. Invemar. Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta. 200 p.

Posada, B. O., y N. Rangel-Buitrago. (2009). Metodología para el levantamiento de perfiles de playa (p: 55–63). En: Alcántara-Carrió, J., I.D. Correa-Arango, F. I. Mendy, M. Alvarado-Ortega, A.H.F. Klein, A. Cabrera-Hernández y Sandoval-Barlow, R. (Eds.). Métodos en Teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral. Servicio de Publicaciones del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Madrid. 297 p

Regeneración de playas (2000), Documento Temático, Universidad de Cantabria.

Roelvink, D., A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, and J. Lescinski (2009), Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56 (11-12), 1133 - 1152, doi:10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.

Ruggiero, P., M. Buijsman, G. M. Kaminsky, and G. Gelfenbaum (2010), Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change, *Marine Geology*, 273 (1-4), 127 -140, doi: DOI:10.1016/j.margeo.2010.02.008.

Ruessink G., Price T. and Castelle B., (2013). Finite-Amplitude Behaviour of alongshore variability in nearshore sandbars: observations and modelling. *Procc. of Coastal Dynamics 2013 (Arcachon, France) SHOM* pp 1-15.

Smith, R.K. and Bryan, K.R., (2007). Monitoring beach face volume with a combination of intermittent profiling and video imagery. *Journal of Coastal Research*, 23(4), 892–898.

Splinter, K. D., R. Holman, and N. Plant (2011a), A behavior-oriented dynamic model for sand bar migration and 2DH evolution, *Journal of Geophysical Research*, 116, C01,020, doi:10.1029/2010JC006382.

Splinter, K. D., and M. L. Palmsten (2012), Modeling dune response to an East Coast Low, *Marine Geology*, 329-331, 46-57, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2012.09.005

Splinter K. D., Turner I. L., Davidson M. A., Barnard P., Castelle B., Joan Oltman-Shay, (2014), A generalized equilibrium model for predicting daily to inter-annual shoreline response, *Article in Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Impact Factor: 3.44 · Doi: 10.1002/2014JF003106

Splinter K. D., Davidson M. A., Turner I.L., Beuzen T., (2014), Estimating Shoreline Response in a Changing Wave Climate, *Coastal Engineering*.

Sutherland, J., and R. L. Soulsby (2003), Use of model performance statistics in modelling coastal morphodynamics., in *Proceedings of Coastal Sediments '03*, vol. CD-ROM, pp.1-4, World Scientific Publishing Co.

Tarbuck E. J. and Lutgens F. K., (2009). "Ciencias de la Tierra 8 Edición – Una Introducción a la Geología Física. ". página web

Erosión, (2004). Tesaurus de la Costa. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. 75p.

Tolman, H. L., (1989). The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft Univ. of Techn., ISSN 0169-6548, Rep. no. 89-2, 72 pp.

Tolman, H. L., (2002b). Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note Nr. 213, 33 pp. (2.7Mb pdf file).

Villagrán M., Cienfuegos R., Almar R., Gironás J., Catalán P., Camaño C. and Dominguez J.C., (2011). Natural post tsunami recovery of Mataquito river mouth after 2010 Chilean tsunami. Procc. AGU Fall Meeting Conference (San Francisco, USA).

Villagrán M., Caamaño D., Cienfuegos R. (2013) Hydrodynamics of a river-associated tidal inlet and maintenance of dynamic equilibrium: preliminary findings, Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70, 2014

Wright, L.D. and Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. Mar. Geol., 56: 93--118.

Wright, L. D., A. D. Short, and M. O. Green (1985), Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model, Marine Geology, 62, 339-364.

Yates, M. L., R. T. Guza, and W. C. O'Reilly (2009), Equilibrium shoreline response: Observations and modeling, *Journal of Geophysical Research*, 114, C09,014, doi:10.1029/2009JC005359.

7. Capítulo VII. Anexos

7.1. Anexo 1: Terminología

Anexo 7.1: Terminología

Playa seca: zona comprendida entre el límite de tierra y el inicio del frente de playa.

Berma: zona cuasi-horizontal de la playa seca formada por la depositación de sedimentos debido a la acción del oleaje. Presenta un cambio brusco de pendiente hacia el mar, denominado **Borde de la berma**. Si hay diferencias entre el oleaje en invierno y verano, se pueden producir dos tipos de bermas, **berma de verano** y **berma de invierno**, estando la berma de verano en un nivel horizontal inferior debido a que el ascenso del oleaje es inferior en época con tiempo tranquilo. Marcando las dos bermas se puede encontrar una zona con mayor pendiente que corresponde a frentes de playa en invierno.

Escarpe de playa: escalón vertical en la playa seca formado por la erosión de la berma producido por un temporal.

Zona Intermareal: abarca desde la parte exterior de la berma y el límite de descenso del oleaje en bajamar.

Frente de playa: zona expuesta a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje.

Escalón de playa: zona de mayor pendiente que aparece en ocasiones en el límite inferior del frente de playa. Suele contener sedimentos más gruesos que en el resto del perfil.

Espigas: Unidas a una fuente de sedimento y creciendo hacia la deriva litoral. Pueden convertirse en islas barrera si una tormenta corta un canal a través de ellas.

Terraza de bajamar: parte de la zona Intermareal situada entre el límite inferior del frente de playa y el límite de descenso del oleaje en bajamar.

Canaleta de Bajamar: depresión de la terraza de bajamar que puede aparecer inmediatamente por debajo del frente de playa. Puede estar asociado al seno de una barra creciente muy próxima al frente de playa.

Barra longitudinal: acumulación de arena cuasi paralela a la línea de costa. En una playa se pueden encontrar varias barras en el perfil, y hay casos que en bajamar la barra inferior pueda quedar expuesta.

Cresta de la barra: zona de mayor elevación de la barra longitudinal.

Seno de la barra: depresión en el perfil de playa asociado con la barra. Se produce inmediatamente hacia el interior de la barra.

Playa sumergida: área comprendida entre el límite de descenso del oleaje en bajamar y el límite exterior del perfil.

7.2. Anexo 2

Anexo 7.2: Tabla resumen de parámetros usados

Transecto 6

caso	$c(m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5})$	r	ϕ (días)	b(m/s)	BSS	NMSE	R
Días	0,0002	0,917	10	0,2	-1,62	2,57	0,11
Semanal	0,0001	1,130	10	-3	-2,37	2,48	0,20
Dos semanas	0,0001	1,215	10	0,7	0,76	0,47	0,92
Días	0,0005	ajustado	10	1	0,72	0,28	0,85
Semanal	0,0001	ajustado	10	0,3	0,73	0,20	0,88
Dos semanas	0,0016	ajustado	10	1,89	0,72	0,26	0,87
Días	0,0002	0,884	50	-1,5	-0,91	1,88	0,19
Semanal	0,0001	0,703	50	-1	-0,87	1,37	0,26
Dos semanas	0,0300	0,766	50	0,09	-1,56	0,87	0,41
Días	0,0002	ajustado	50	-1,5	-0,76	1,72	0,40
semanal	0,0100	ajustado	50	3	0,71	0,21	0,89
dos semanas	0,0300	ajustado	50	6	0,55	0,15	0,91

Transecto 2

caso	$c(m^{1.5}s^{-1}W^{-0.5})$	r	ϕ (días)	b(m/s)	BSS	NMSE	R
Días	0,00011	0,92	10	0,2	-1,58	2,57	0,04
Semanal	0,00004	1,13	10	-0,8	-1,75	2,27	0,03
Dos semanas	0,00006	1,21	10	0,1	0,72	0,17	0,92
Días	0,00038	ajustado	10	0,7	0,23	0,76	0,57
Semanal	0,00005	ajustado	10	0,5	0,63	0,30	0,80
Dos semanas	0,00150	ajustado	10	2,1	0,51	0,30	0,87
Días	0,00012	0,88	50	1,3	-0,70	1,68	0,14
Semanal	0,00003	0,7	50	0,3	-0,03	0,85	0,46
Dos semanas	0,00003	0,77	50	0,2	0,37	0,38	0,84
Días	0,00012	ajustado	50	1	-0,48	1,47	0,40
semanal	0,00435	ajustado	50	2,2	0,88	0,10	0,97
dos semanas	0,02160	ajustado	50	4,3	0,91	0,05	0,99

7.3. Anexo 3

Anexo 7.3: Resumen de estadísticos, extraídos de Splinter et al., 2014

Table 1. Summary of site statistics. ^a sediment grain size varies considerably at these sites. Previously reported values/means are used here.

Site	Type	d_{50} (mm)	$\bar{\Omega}$	$\bar{\sigma}_{\Omega_{360}}$	$\bar{\sigma}_{\Omega_{30}}$	$\bar{\sigma}_{\Omega_{360}}/\bar{\sigma}_{\Omega_{30}}$	Primary Wave Buoy ID (depth, m)
North Head, WA	Exposed	0.2	12.38	4.48	3.69	1.21	NDBC 46029 (145)
Truc Vert, FR	Exposed	0.3 ^a	6.19	2.70	2.22	1.22	WWIII(70) & Buoy (54m)
Gold Coast, QLD	Exposed	0.25	6.17	2.08	1.84	1.13	Gold Coast (17)
Ocean Beach, OB8, CA	Exposed	0.3	5.29	1.78	1.50	1.19	CDIP 029 (550) & SWAN (10)
Ocean Beach, OB5, CA	Exposed	0.3	5.21	1.73	1.48	1.17	
Torrey Pines, CA	Exposed	0.23	5.04	1.89	1.65	1.12	CDIP 100 (554)
Duck, NC	Exposed	0.3 ^a	5.06	2.61	2.35	1.11	FRF (17)
Narrabeen, PF1, NSW	Embayed	0.4	4.08	1.36	1.27	1.07	
Narrabeen, PF2, NSW	Embayed	0.4	3.73	1.25	1.17	1.08	
Narrabeen, PF4, NSW	Embayed	0.4	3.75	1.32	1.23	1.07	Sydney (74) & SWAN (15)
Narrabeen, PF6, NSW	Embayed	0.4	3.67	1.31	1.23	1.07	
Narrabeen, PF8, NSW	Embayed	0.4	3.08	1.23	1.15	1.07	
Narrabeen, 2600, NSW	Embayed	0.4	3.67	1.31	1.23	1.07	

7.4. Anexo 4

Anexo 7.4: Parámetros de error, Extraídos Splinter et al., 2014

Table 4. Skill assessment of all model results based on individual calibration to full data set.

Significant skill is defined as having an $R \geq 0.70$ and BSS ≥ 0.6 .

Site	R	BSS	NMSE	Significant
North Head, WA	0.82	0.85	0.33	Y
Truc Vert, FR	0.83	0.83	0.31	Y
Gold Coast, QLD	0.80	0.80	0.36	Y
Ocean Beach, OB8, CA	0.80	0.80	0.40	Y
Ocean Beach, OB5, CA	0.79	0.81	0.37	Y
Duck, NC	0.72	0.68	0.48	N
Narrabeen, PF1, NSW	0.65	0.72	0.58	N
Narrabeen, PF2, NSW	0.61	0.72	0.63	N
Narrabeen, PF4, NSW	0.63	0.76	0.60	N
Narrabeen, PF6, NSW	0.81	0.76	0.35	Y
Narrabeen, PF8, NSW	0.78	0.70	0.39	Y
Narrabeen, 2600, NSW	0.82	0.78	0.33	Y

7.5. Anexo 5

Anexo 7.5: Parámetros para inferir error, Splinter et al., 2014.

Table 3. Summary of qualitative skill assessments based on Brier Skill Scores (BSS) and normalized mean square error (NMSE).

Skill	BSS	NMSE
Poor	0 - 0.3	> 0.8
Fair	0.3 - 0.6	0.6- 0.8
Good	0.6 - 0.8	0.3 - 0.6
Excellent	> 0.8	< 0.3

7.6. Anexo 6

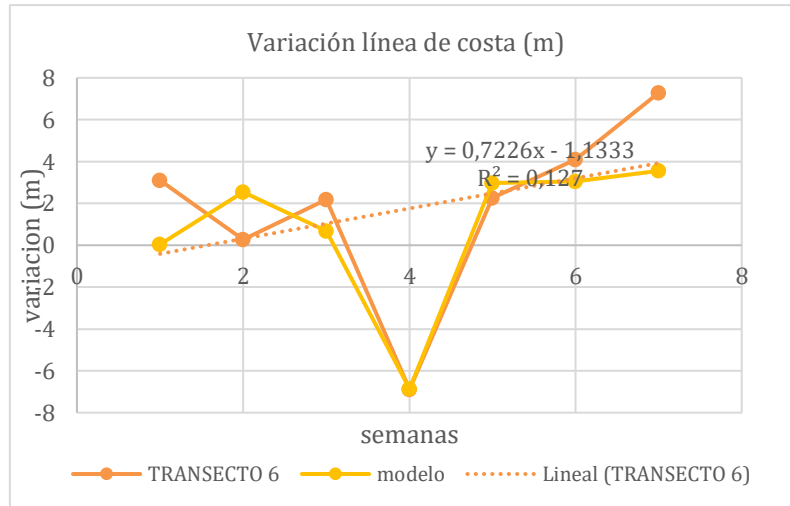


Figura 7.1: Ejemplo del cálculo error para análisis semanal

A continuación, se muestra como se obtuvo x_b incluido en la formulación del error BSS. La ecuación para el cálculo de x_b viene dada por la tendencia lineal de los datos medidos por el transecto.

	15/08/13-21/08/13
X	3,100316507
Xm	0,033084855
semana	1
Xb	=(0,7226*B248)-1,1333
abs(X-Xm)	3,067231652
X-Xb	3,5110165
abs(X-Xm)^2	9,40791001
(X -Xb)^2	12,32723692

Tabla de ejemplo cálculo de error para análisis semanal

	15/08/13- 21/08/13	22/08/13- 28/08/13	29/08/13- 04/09/13	05/09/13- 11/09/13	12/09/13- 18/09/13	19/09/13- 25/09/13	26/09/13- 30/09/13
X	3,100	0,275	2,187	-6,887	2,257	4,086	7,281
Xm	0,033	2,536	0,688	-6,862	2,982	3,062	3,554
semana	1	2	3	4	5	6	7
Xb	-0,411	0,312	1,035	1,757	2,480	3,202	3,925
X-Xm	3,067	2,261	1,499	0,025	0,724	1,024	3,727
X-Xb	3,511	-0,036	1,152	-8,644	-0,222	0,883	3,356
X-Xm ^2	9,408	5,110	2,247	0,001	0,525	1,048	13,889
X-Xb ^2	12,327	0,001	1,328	74,724	0,049	0,780	11,262
	BSS	0,68					
	NMSE	0,24					
	R	0,88					