



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Estimación de la tasa anual de transporte potencial
longitudinal de sedimentos utilizando la fórmula de
Van Rijn y Kamphuis modificada (2013) en la bahía de
Miraflores (tramo playa Los Delfines – playa Los
Cocos)**

INFORME PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Paul Dante BERROCAL PAREJA

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Berrocal, P. (2022). *Estimación de la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos utilizando la fórmula de Van Rijn y Kamphuis modificada (2013) en la bahía de Miraflores (tramo playa Los Delfines – playa Los Cocos)*. [Informe profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

| Datos de autor | |
|----------------------------------|---|
| Nombres y apellidos | PAUL DANTE BERROCAL PAREJA |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 47103492 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0003-3541-8178 |
| Datos de asesor | |
| Nombres y apellidos | - |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | - |
| URL de ORCID | - |
| Datos del jurado | |
| Presidente del jurado | |
| Nombres y apellidos | GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 07209368 |
| Miembro del jurado 1 | |
| Nombres y apellidos | DE LA TORRE OSTOS JUAN MIGUEL |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 09634918 |
| Miembro del jurado 2 | |
| Nombres y apellidos | EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 40420005 |
| Miembro del jurado 3 | |
| Nombres y apellidos | |
| Tipo de documento | DNI |

| | |
|--|---|
| Número de documento de identidad | |
| Datos de investigación | |
| Línea de investigación | A.2.5.2. Recursos Hídricos |
| Grupo de investigación | |
| Agencia de financiamiento | PROPIA |
| Ubicación geográfica de la investigación | <p>País: Perú Departamento: - Provincia: Provincia Constitucional del Callao Distrito: Callao Latitud: -12°00'03.7190" Longitud: -77°08'26.1363"</p> |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | 2021-2022 |
| URL de disciplinas OCDE | <p>Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01</p> |



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

**SUSTENTACIÓN VIRTUAL DEL INFORME PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE TITULACIÓN M-4 – POR EXPERIENCIA
PROFESIONAL**

Siendo las 15:00 horas del día viernes 9 de diciembre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA y con la asistencia de los miembros Mg. Ing. EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA y el Mg. Ing. JUAN MIGUEL DE LA TORRE OSTOS, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación del Informe Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-4 Por Experiencia Profesional, del Bachiller:

PAUL DANTE BERROCAL PAREJA

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller PAUL DANTE BERROCAL PAREJA, a realizar la Exposición del Informe Profesional titulado “ESTIMACIÓN DE LA TASA ANUAL DE TRANSPORTE POTENCIAL LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS UTILIZANDO LA FÓRMULA DE VAN RIJN Y KAMPHUIS MODIFICADA (2013) EN LA BAHÍA DE MIRAFLORES (TRAMO PLAYA LOS DELFINES – PLAYA LOS COCOS)”.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida por el Bachiller, la misma que fue:

DIECISIETE 17

El presidente del Jurado Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller PAUL DANTE BERROCAL PAREJA Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 16:00 horas del mismo día, se levantó la sesión.

Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
PRESIDENTE DEL JURADO

Mg. Ing. EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA
MIEMBRO DEL JURADO

Mg. Ing. JUAN MIGUEL DE LA TORRE OSTOS
MIEMBRO DEL JURADO

UNMSM

Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuer Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.12.2022 21:45:54 -05:00

**DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA
VICEDECANO ACADÉMICO FCF**

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us06web.zoom.us/j/87833919347?pwd=dTNXMkpYQ1o4Y2Jyc0E2MExrbndPUT09>

ID de reunión: 878 3391 9347

Código de acceso: 172112

Grabación archivada en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1J7v636HUkf98SqxQ_bwR36ozBqKBS_va/view?usp=sharing

Anexo 1

Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)
“ESTIMACIÓN DE LA TASA ANUAL DE TRANSPORTE POTENCIAL LONGITUDINAL UTILIZANDO LAS FÓRMULAS DE VAN RIJN Y KAHAMPIUS MODIFICADA (2013) EN LA BAHÍA DE MIRAFLORES (TRAMO PLAYA LOS DELFINES – PLAYA LOS COCOS)”
7. Autor del documento (2)
PAUL DANTE BERROCAL PAREJA
8. Fecha de recepción del documento 1°/12/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 3/12/22
10. Software utilizado
 - Turnitin (X)
 - Ithenticate
 - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes³
5%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas⁴
14. Observaciones
Ninguna
15. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
 - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 31 /12 /22



UNMSM

Firmado digitalmente por SARANGO
JULCA Douglas Donal FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 02.01.2023 17:11:57 -05:00

DR. ING. Douglas Sarango Julca

DIRECTOR (e) DE LA EPIMF

1 Otro (especificar) Informe Profesional Modalidad de Titulación M-4

2 Apellidos y Nombres completos

3 En letras y números

4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje

RESUMEN

En el trabajo de suficiencia profesional se ha evaluado la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos en la bahía de Miraflores (tramo playa Los Delfines – playa Los Cocos) mediante las fórmulas empíricas de Van Rijn y Kamphuis modificada (2013).

Para determinar la tasa de transporte de sedimento se requirió principalmente contar con datos de muestras de sedimentos de fondo (obtenidos de campañas de medición), la pendiente del terreno (calculado a partir de cartas náuticas) y de datos de oleaje en la bahía de Miraflores. Debido a la falta de información registrada durante los últimos años, se desarrolló un modelo de propagación de oleaje con el software numérico Mike 21 SW. Una vez establecido el modelo, se propagó los datos de oleaje en aguas profundas (obtenido de una base global) hacia aguas poco profundas (zona de interés) y se validó y calibró con la información de oleaje registrada dentro de la bahía. Posteriormente se estableció 12 puntos distribuidos a lo largo de un tramo paralelo al borde costero de nuestra zona de estudio brindando así un mejor panorama del transporte de sedimentos dentro de la bahía.

Finalmente se analizó la evolución del borde costero durante los últimos 18 años mediante la comparación de ortofotos obtenidas de Google Earth verificando cualitativamente los resultados obtenidos de las fórmulas empíricas utilizadas.

Palabras clave: sedimento, transporte, longitudinal, oleaje, modelo, Mike 21.

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| I INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD | 2 |
| 2.1 Institución Donde se Desarrolló la Actividad..... | 2 |
| 2.2 Periodo de Duración de la Actividad..... | 2 |
| 2.3 Finalidad y Objetivo de la Entidad | 2 |
| 2.4 Razón Social | 2 |
| 2.5 Dirección Postal..... | 2 |
| 2.6 Dirección de Correo Electrónico del Profesional a Cargo..... | 2 |
| III DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD | 3 |
| 3.1 Organización de la Actividad | 3 |
| 3.2 Objetivos..... | 3 |
| 3.2.1 Objetivo Principal..... | 3 |
| 3.2.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 3.3 Problemática | 4 |
| 3.4 Metodología..... | 4 |
| 3.5 Procedimientos | 5 |
| 3.5.1 Fuentes de Datos | 5 |
| 3.5.2 Establecimiento del Modelo de terreno | 5 |
| 3.5.3 Propagación de oleaje | 5 |
| 3.5.4 Reconstrucción del clima de oleaje | 6 |
| 3.5.5 Análisis del tramo del borde costero | 6 |
| 3.5.6 Cálculo de la tasa de transporte de sedimentos..... | 6 |
| 3.6 Resultados de la actividad..... | 6 |
| 3.6.1 Sustento teórico..... | 6 |
| IV CONCLUSIONES..... | 109 |
| V RECOMENDACIONES | 111 |
| VI BIBLIOGRAFÍA | 112 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Ubicación ADCP | 28 |
| Tabla 2 Valores mínimos, percentil 25%, 50%, 75% y máximo de los parámetros de Hs, Tp, Dm y Dp. | 36 |
| Tabla 3 Casos paramétricos condiciones promedio, máximos anuales y extremales..... | 39 |
| Tabla 4 Parámetros estadísticos r,m, BIAS, RMSE, SI y PE- Primera Ubicación..... | 70 |
| Tabla 5 Parámetros estadísticos r,m, BIAS, RMSE, SI y PE - Segunda Ubicación..... | 70 |
| Tabla 6 Parámetros estadísticos r,m, BIAS, RMSE, SI y PE - Tercera Ubicación. | 70 |
| Tabla 7 Valor de Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Primera Ubicación. | 71 |
| Tabla 8 Valor de Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Segunda Ubicación. | 71 |
| Tabla 9 Valor de Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Tercera Ubicación. | 72 |
| Tabla 10 Diferencia Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Primera Ubicación. | 72 |
| Tabla 11 Diferencia Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Segunda Ubicación. | 72 |
| Tabla 12 Diferencia Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Tercera Ubicación. | 73 |
| Tabla 13 Valores altura de ola mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando una Dirección media. | 77 |
| Tabla 14 Valores dirección de oleaje mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando una Dirección media. | 78 |
| Tabla 15 Valores altura de ola mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando una Dirección pico..... | 78 |
| Tabla 16 Valores dirección de oleaje mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando una Dirección pico..... | 79 |
| Tabla 17 Diámetro medio de sedimentos superficiales de la franja costera de la bahía de Miraflores. | 96 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Organización de la actividad..... | 3 |
| Figura 2 Imagen izquierda mar de viento e imagen derecha mar de fondo..... | 7 |
| Figura 3 Propagación del oleaje en aguas profundas desde la zona de generación | 8 |
| Figura 4 Ejemplo de serie temporal de desplazamiento de la superficie del mar..... | 9 |
| Figura 5 Descripción de la superficie libre del mar mediante el sumatorio de infinitas componentes sinusoidales con dirección, amplitud, periodo y fase diferentes..... | 11 |
| Figura 6 Espectro de Oleaje 3D (Imagen izquierda) y Espectro Polar (Imagen derecha)..... | 13 |
| Figura 7 Zonas de generación del oleaje que llega al litoral peruano | 14 |
| Figura 8 Espectros polares de energía de estados de mar característicos del Pacífico sur. De izquierda a derecha: Espectro unimodal de un swell del SW / Espectro multimodal de un swell del NW, swell de SW y oleaje de viento del SSW / Espectro multimodal de swell del NW y swell de SSW / Espectro multimodal de un swell del SW y un oleaje de viento del SSW | 14 |
| Figura 9 Asombramiento de las olas | 15 |
| Figura 10 Refracción de la ola..... | 16 |
| Figura 11 Difracción del oleaje incidente en el puerto de Salaverry | 17 |
| Figura 12 Tipos de rotura | 18 |
| Figura 13 Corrientes y transporte de sedimentos ocasionados por la rotura de oleaje | 21 |
| Figura 14 Esquema del comportamiento en planta de un tramo teórico de litoral..... | 23 |
| Figura 15 Definición del ángulo de propagación de las olas con respecto a la costa. | 24 |
| Figura 16 Ubicación de los equipos ADCP AWAC..... | 28 |
| Figura 17 Gráficas de Histograma Hs, Tp, Dm y Dp y Rosas de oleaje Hs vs Dm y Hs vs Dp – Primera Ubicación..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 Gráficas de Histograma Hs, Tp, Dm y Dp y Rosas de oleaje Hs vs Dm y Hs vs Dp – Segunda Ubicación..... | 29 |
| Figura 19 Gráficas de Histograma Hs, Tp, Dm y Dp y Rosas de oleaje Hs vs Dm y Hs vs Dp – Tercera Ubicación..... | 30 |
| Figura 20 Gráficas de espectros polares, frecuenciales y direccionales..... | 32 |
| Figura 21 Ortofoto Google earth - Fecha 18/01/2022..... | 34 |
| Figura 22 Ubicación nodo aguas profundas | 35 |
| Figura 23 Gráficas de Histograma Hs, Tp, Dm y Dp y Rosas de oleaje Hs vs Dm y Hs vs Dp – Nodo CSIRO | 35 |
| Figura 24 Modelo de terreno generado para modelamientos de oleaje | 37 |
| Figura 25 Malla general flexible generado modelo MIKE 21 SW para propagación hasta aguas poco profundas | 37 |
| Figura 26 Bordes de la malla del Modelo..... | 38 |
| Figura 27 Propagación de oleaje con dirección Sur (180°), condición promedio (Hs=2.32m, Tp=9.43s). | 41 |
| Figura 28 Propagación de oleaje con dirección Sur - Suroeste (202.5°), condición promedio (Hs=2.14m, Tp=14.29s). | 42 |
| Figura 29 Propagación de oleaje con dirección Suroeste (225°), condición promedio (Hs=1.96m, Tp=14.49s). | 43 |
| Figura 30 Propagación de oleaje con dirección Oeste Suroeste (247.5°), condición promedio (Hs=1.76m, Tp=14.71s). | 44 |
| Figura 31 Propagación de oleaje con dirección Oeste (270°), condición promedio (Hs=1.75m, Tp=15.63s). | 45 |
| Figura 32 Propagación de oleaje con dirección Oeste Noroeste (292.5°), condición promedio (Hs=1.71m, Tp=16.34s). | 46 |
| Figura 33 Propagación de oleaje con dirección Sur (180°), condición máximo anual (Hs=4.50m, Tp=10.30s). | 47 |
| Figura 34 Propagación de oleaje con dirección Sur - Suroeste (202.5°), condición máximo anual (Hs=4.14m, Tp=16.62s). | 48 |
| Figura 35 Propagación de oleaje con dirección Suroeste (225°), condición promedio (Hs=3.71m, Tp=17.54s). | 49 |
| Figura 36 Propagación de oleaje con dirección Oeste Suroeste (247.5°), condición promedio (Hs=3.24m, Tp=18.71s). | 50 |
| Figura 37 Propagación de oleaje con dirección Oeste (270°), condición promedio (Hs=2.91m, Tp=19.28s). | 51 |
| Figura 38 Propagación de oleaje con dirección Oeste Noroeste (292.5°), condición promedio (Hs=2.82m, Tp=19.23s). | 52 |
| Figura 39 Propagación de oleaje con dirección Sur (180°), condición extremal (Hs=5.00m, Tp=11.11s). | 53 |
| Figura 40 Propagación de oleaje con dirección Sur - Suroeste (202.5°), condición extremal (Hs=5.10m, Tp=17.24s). | 54 |
| Figura 41 Propagación de oleaje con dirección Suroeste (225°), condición extremal (Hs=5.20m, Tp=18.64s). | 55 |
| Figura 42 Propagación de oleaje con dirección Oeste Suroeste (247.5°), condición extremal (Hs=3.68m, Tp=17.54s). | 56 |
| Figura 43 Propagación de oleaje con dirección Oeste (270°), condición extremal (Hs=3.29m, Tp=18.53s). | 57 |
| Figura 44 Propagación de oleaje con dirección Oeste Noroeste (292.5°), condición extremal (Hs=3.29m, Tp=18.48s). | 58 |
| Figura 45 Modelo de terreno con presencia de las islas horadas (Lado izquierdo) e imagen satelital del oleaje refractado y difractado (Lado derecho). | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 46 Comparación Hs obtenido de la energía total y Hs_SWELL obtenido de la energía filtrada – Primera ubicación. | 61 |
| Figura 47 Comparación Hs obtenido de la energía total y Hs_SWELL obtenido de la energía filtrada – Segunda ubicación. | 61 |
| Figura 48 Comparación Hs obtenido de la energía total y Hs_SWELL obtenido de la energía filtrada – Tercera ubicación. | 62 |
| Figura 49 Comparaciónn entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Primera ubicación | 63 |
| Figura 50 Comparaciónn entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Segunda ubicación | 64 |
| Figura 51 Comparaciónn entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Tercera ubicación | 65 |
| Figura 52 Correlación entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Primera ubicación | 67 |
| Figura 53 Correlación entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Segunda ubicación | 68 |
| Figura 54 Correlación entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Segunda ubicación | 69 |
| Figura 55 Superposición de series de tiempo Hs, Tp y Dm entre los datos medidos y modelados – Primera ubicación. | 75 |
| Figura 56 Superposición de series de tiempo Hs, Tp y Dm entre los datos medidos y modelados – Segunda ubicación. | 75 |
| Figura 57 Superposición de series de tiempo Hs, Tp y Dm entre los datos medidos y modelados – Tercera ubicación. | 76 |
| Figura 58 Vista en planta de la ubicación de los puntos de reconstrucción sobre ortofoto Google Earth. | 77 |
| Figura 59 Rosas de Oleaje de los puntos reconstruidos sobre ortofoto Google Earth utilizando la dirección media. | 79 |
| Figura 60 Rosas de Oleaje de los puntos reconstruidos utilizando la dirección pico. | 80 |
| Figura 61 Esquema de funcionamiento de la unidad fisiográfica en nuestro tramo de estudio. | 82 |
| Figura 62 Principales cauces fluviales con sus cuencas hidrográficas en la región de lima. | 84 |
| Figura 63 Vista de terrazas aluviales en la zona de Magdalena año 1960. | 85 |
| Figura 64 Ortofotos del año 2003 y 2017 del tramo San Isidro La Perla. | 86 |
| Figura 65 Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Enero 2004 – Marzo 2022 | 89 |
| Figura 66 Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Enero 2009 – Marzo 2011 | 90 |
| Figura 67 Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Abril 2012 – Enero 2013 | 91 |
| Figura 68 Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Abril 2014 – Mayo 2016 | 92 |
| Figura 69 Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Marzo 2017 – Mayo 2018 | 93 |
| Figura 70 Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Marzo 2020 – Marzo 2022 | 94 |
| Figura 71 Ortofoto del 09 de abril 2013. | 95 |
| Figura 72 Caracterización de sedimentos superficiales de la franja costera de la bahía de Lima. | 96 |
| Figura 73 Campañas de caracterización subsuperficial realizadas por INMAR – GEOMYTSA en 2019 – 2020. | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 74 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dm y rugosidad de 0.10 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=40mm | 100 |
| Figura 75 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dm y rugosidad de 0.10 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=20mm | 101 |
| Figura 76 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.10 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=40mm | 102 |
| Figura 77 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.10 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=20mm | 103 |
| Figura 78 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dm y rugosidad de 0.05 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=40mm | 104 |
| Figura 79 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dm y rugosidad de 0.05 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=20mm | 105 |
| Figura 80 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.05 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=40mm | 106 |
| Figura 81 Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphius modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.05 para reconstruir la serie de oleaje en aguas someras) para guijarros con D50=20mm | 107 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Ecuación 1: Superficie libre..... | 10 |
| Ecuación 2: Momento espectral | 11 |
| Ecuación 3: Altura de ola significativa espectral | 12 |
| Ecuación 4: Dirección media..... | 12 |
| Ecuación 5: Periodo medio | 12 |
| Ecuación 6: Densidad Espectral | 19 |
| Ecuación 7: Balance de acción de las olas | 20 |
| Ecuación 8: Fórmula de Kamphuis Modificada -2013 (m ³ /s)..... | 25 |
| Ecuación 9: Fórmula del ángulo de incidencia de la ola (normal a la costa) en la zona de rompiente. | 26 |
| Ecuación 10: Fórmula de Van Rjin -2013 (m ³ /s) | 26 |
| Ecuación 12: RMSE (Error cuadrático medio)..... | 66 |
| Ecuación 13: BIAS (Sesgo entre el dato modelado y medido)..... | 66 |
| Ecuación 14: SI (Indice de dispersión) | 66 |
| Ecuación 15: PE (Porcentaje de error) | 66 |

I INTRODUCCIÓN

En el año 2021 la empresa Ingeniería Marítima y Costera fue contratada por el Gobierno Regional del Callao para desarrollar el proyecto denominado “Evaluación y sustento técnico para arbitraje de la obra construcción de la vía costa verde – tramo callao”, dentro de este proyecto se analizó principalmente los procesos de dinámica litoral en el tramo callao de la vía costa verde.

Tomando como información base parte de lo desarrollado en este proyecto, la presente monografía se centrará en estudiar el transporte potencial longitudinal de sedimentos cuantitativa y cualitativamente mediante las fórmulas empíricas de Van Rijn y Kamphuis Modificada – 2013.

Para desarrollar el cálculo de la tasa anual del transporte potencial longitudinal de sedimentos es necesario conocer el comportamiento del oleaje en la bahía de Miraflores; teniendo esta premisa se caracterizará el oleaje en aguas profundas y luego con ayuda del software numérico MIKE 21 SW se propagará el oleaje hasta la zona de estudio. Este modelo de propagación de oleaje será validado y calibrado con información de olas registrada dentro de la bahía. Una vez establecido el modelo se reconstruirá el clima de olas en 12 puntos ubicados paralelamente al borde costero del tramo de estudio.

Por último, se realizarán los cálculos de transporte potencial longitudinal utilizando los datos de olas en aguas someras, la pendiente del terreno y el diámetro medio del tipo de sedimento predominante a lo largo del borde costero. Adicionalmente se analizará la evolución del borde costero mediante ortofotos históricas que nos permitan corroborar cualitativamente los resultados obtenidos del transporte.

II INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución Donde se Desarrolló la Actividad

La empresa Ingeniería Marítima y Costera S.A.C (INMAR) se encuentra ubicada en el distrito de Santiago de Surco, provincia de Lima, departamento de lima.

2.2 Periodo de Duración de la Actividad

El periodo de duración de la actividad del presente trabajo fue de 04 meses, desde abril del 2021 hasta julio de 2021.

2.3 Finalidad y Objetivo de la Entidad

Brindar asesoría especializada para la concepción, diseño, elaboración, aprobación y supervisión de proyectos de instalaciones acuáticas en el Perú, con fines portuarios, náutica deportiva recreativa y pesqueros, mediante la aplicación de tecnología, experiencia, creatividad y profesionalismo, con la finalidad de satisfacer las necesidades de nuestros clientes y garantizar la rentabilidad de sus proyectos.

2.4 Razón Social

Ingeniería Marítima y Costera S.A.C – RUC: 20600430336

2.5 Dirección Postal

La dirección de la empresa es Jr.Tomasal 433 Urbanización Eucalipto Urb. Santiago de Surco, Lima, Perú.

2.6 Dirección de Correo Electrónico del Profesional a Cargo

Correo electrónico: paul.berrocal@inmar.pe

III DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la Actividad

La organización de la actividad se desarrolló de la siguiente manera:

Figura 1

Organización de la actividad



Nota. Elaboración propia

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo Principal

Determinar la tasa anual del transporte potencial longitudinal del transporte de sedimentos mediante las fórmulas de Van Rijn y Kamphuis modificada (2013) en el tramo de estudio (playa Los Delfines – playa Los Cocos).

3.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar la data de oleaje en aguas profundas (Enero 1979 – Marzo 2022), obtenida de una base ubicada a 95 km al Sur oeste del área de estudio.

- Realizar un análisis de los datos de oleaje registrados por un equipo ADCP en 03 ubicaciones diferentes para así poder describir el clima de olas en nuestro ámbito de estudio.
- Establecer un modelo de propagación de olas con el software MIKE 21 SW el cual será calibrado y validado con los datos de olas medidas in situ, mediante este modelo se reconstruirá el clima de olas en aguas someras y a su vez será utilizado para estimar la tasa anual del transporte potencial longitudinal de sedimentos.
- Análisis de la dinámica litoral del tramo de estudio durante los últimos 18 años (2004 – 2022) mediante el uso de ortofotos obtenidos de Google Earth.

3.3 Problemática

Durante los últimos 20 años la bahía de Miraflores (Tramo Playa los Delfines – Playa los Cocos) ha sufrido cambios relevantes en el borde costero. Para desarrollar cualquier actuación es importante comprender los procesos litorales en el tramo en estudio.

Desde el punto de vista sedimentario la costa puede entenderse como un mecanismo de distribución de las partículas sólidas que llegan al litoral. Por lo que es necesario identificar y cuantificar las fuentes de suministro de sedimentos, la red de transporte de estas partículas sólidas y los drenes/sumideros donde se produce la salida de los sedimentos.

Por lo expuesto, es necesario realizar estudios del medio marítimo enfocándose en analizar los procesos hidrodinámicos (agentes climáticos marinos) y los procesos sedimentarios en la unidad fisiográfica costera a la que pertenece el tramo en estudio.

3.4 Metodología

La evaluación de la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos en la bahía de Miraflores (Tramo playa Los Delfines – playa Los Cocos), se desarrollará de la siguiente manera:

- Análisis de los datos de olas medidos en campo por un equipo ADCP en 03 ubicaciones dentro del ámbito de estudio.

- Extracción y análisis de datos de olas de una base ubicada en aguas profundas a 95km al sur oeste del tramo de estudio.
- Modelamiento de propagación de oleaje desde aguas profundas hasta costa.
- Calibración y validación del modelo de olas utilizando los datos de olas medidos en campo.
- Reconstrucción del clima de olas en 12 puntos, los cuales se ubican a una paralela de 360m al borde costero del tramo de estudio.
- Análisis del tramo del borde costero en base a ortofotos históricas obtenidas de Google Earth.
- Cálculo de la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos mediante las fórmulas de Van Rijn y Kamphuis Modificada (2013).

3.5 Procedimientos

3.5.1 Fuentes de Datos

- Datos de olas registrados en 03 ubicaciones cercanas al tramo de estudio.
- Datos de olas obtenidos de un nodo ubicado en aguas profundas.
- Cartas náuticas.
- Batimetrías realizadas.
- Información de muestras de sedimentos.
- Ortofotos históricas obtenidas de Google Earth.

3.5.2 Establecimiento del Modelo de terreno

A partir de las cartas náuticas y batimetrías se establecerá el modelo de terreno que será utilizado en el modelamiento de propagación de oleaje.

3.5.3 Propagación de oleaje

Se realizará un modelamiento de propagación de oleaje para analizar el clima de olas en la zona de estudio, el cual será validado con datos de olas registrados en campo para poder tener certeza que el modelo reproduce correctamente los parámetros de olas en nuestra zona de estudio.

3.5.4 Reconstrucción del clima de oleaje

Una vez establecido el modelo de propagación de oleaje, se reconstruirá el clima de olas en 12 puntos paralelos al tramo de borde costero a estudiar, con el fin de poder obtener la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos.

3.5.5 Análisis del tramo del borde costero

A través de ortofotos de Google Earth se analizará el avance y retroceso de la línea de costa del tramo de estudio durante los últimos 18 años.

3.5.6 Cálculo de la tasa de transporte de sedimentos

Se calculará la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos en el tramo del borde costero con las fórmulas de Van Rijn y Kamphuis modificada (2013).

3.6 Resultados de la actividad

3.6.1 Sustento teórico

3.6.1.1 Oleaje.

3.6.1.1.1 Introducción a la teoría de oleaje.

Según GIOC (2000) el oleaje es definido como los movimientos que tienen períodos entre los 2 y 30 segundos, generados por el viento y otras fuerzas generadoras que se propagan desde un área de generación y, que conforme avanzan, van perdiendo lentamente energía por fricción con la atmósfera y por viscosidad molecular y que finalmente se disipan al alcanzar las costas donde se dan los procesos de rotura de las olas.

A medida que el oleaje se propaga fuera de la zona de generación, se producen un fenómeno de separación de los trenes de ondas que lo componen. Una parte de olas que separa se caracterizan por tener períodos mayores y se adelanta a las olas de períodos menores mediante una dispersión radial, y la otra parte posee menores períodos y porta mayor energía.

El oleaje se puede clasificar en dos tipos:

- **Mar de viento (Sea):** Este tipo de oleaje se presenta en la zona de generación, se caracteriza por ser un oleaje irregular con una energía distribuida en diferentes frecuencias y direcciones. Este oleaje presenta longitudes de onda menores a los 100m y periodos por debajo de los 10s.
- **Mar de fondo (Swell):** Este tipo de oleaje se presenta a grandes distancias de la zona de generación, se caracteriza por ser un oleaje regular con frentes de olas mejor estructuradas y con una dirección predominante. Este oleaje presenta longitudes de onda de varios centenares de metros y periodos que pueden llegar a los 25-30s.

Figura 2

Imagen izquierda mar de viento e imagen derecha mar de fondo



Nota. Imagen izquierda adaptada de la página de la NOAA [Fotografía], NOAA

(<https://www.aoml.noaa.gov/es/news/category/oceans-climate/page/2/>). Imagen derecha

adaptada de Chicama [Fotografía], surf-forecast (<https://pt.surf-forecast.com/breaks/Chicama/photos/11179>).

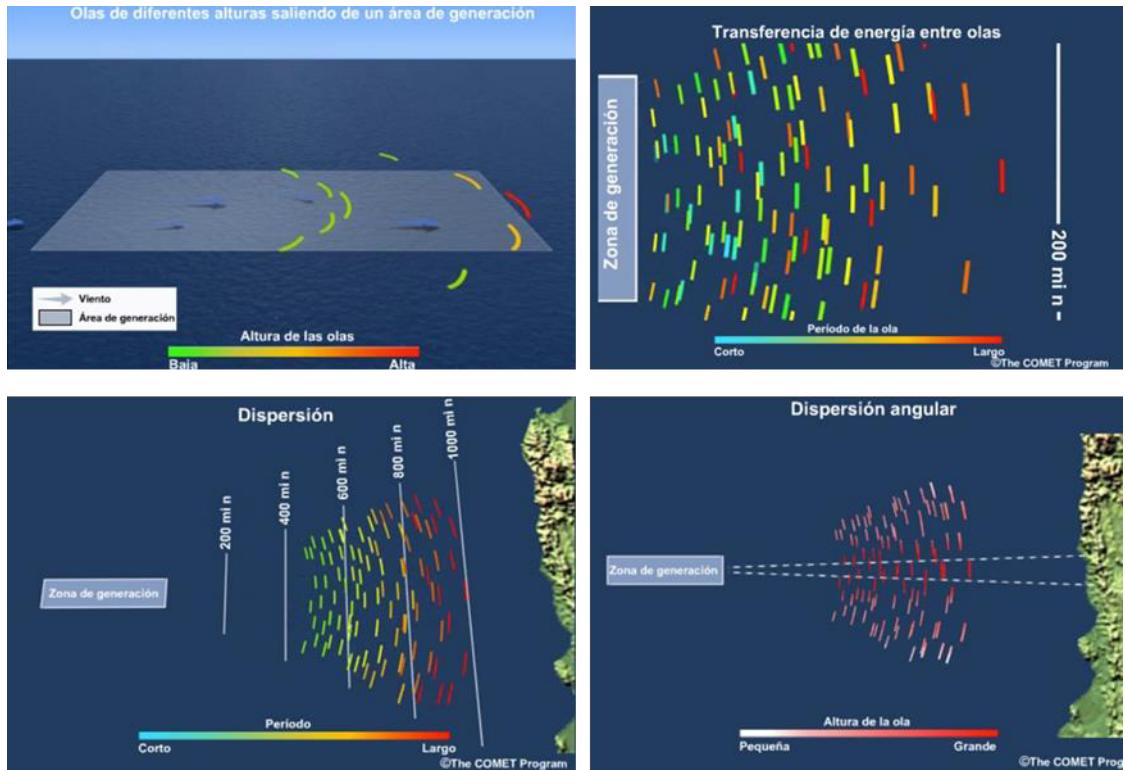
Según (Rodriguez, 2021) para un mar de viento la magnitud de la altura y el periodo del oleaje aumentan con la intensidad, la duración y longitud de la zona de generación del viento (fetch).

Sin embargo, para el mar de fondo la altura disminuye y el periodo aumenta a medida que la distancia desde la zona de generación aumenta. Esto ocurre por los fenómenos de transferencia no lineal de energía entre frecuencias (mayor en la zona próxima a la

generación), de dispersión angular y de frecuencia, así como también por la disipación de la energía del oleaje (mayor en aguas poco profundas).

Figura 3

Propagación del oleaje en aguas profundas desde la zona de generación



Nota. Adaptado de Ciclo de vida de las olas II: propagación y dispersión - Comet Program

(https://www.meted.ucar.edu/marine/mod3_wlc_propdis_es/navmenu.php?tab=1&page=1-0-0&type=flash)

De acuerdo con lo comentado, si se analiza el oleaje en una zona específica del mar se puede identificar oleaje tipo sea producido por vientos locales y diversos oleajes tipo swell producidos por borrascas extratropicales ubicadas a kilómetros de la zona.

Debido a que el oleaje es irregular, la evaluación de las propiedades del oleaje es prácticamente imposible en un análisis ola a ola en el dominio del tiempo, las series temporales se dividen en intervalos de tiempo denominados estados de mar, determinando así los parámetros representativos de altura, periodo y dirección del oleaje.

3.6.1.1.2 ESTADO DE MAR

Según (GIOC,2000) un estado de mar se define con base en una categoría de procesos estocásticos estacionarios ergódicos que establece que dentro del intervalo de tiempo del estado de mar las propiedades estadísticas del mismo se obtendrán de una muestra de un mayor tamaño que es representado por dicho estado de mar. Esa muestra representativa asegura la bondad de cálculos estadísticos en ese intervalo de estado de mar y en toda el área espacial asignada al punto de medida.

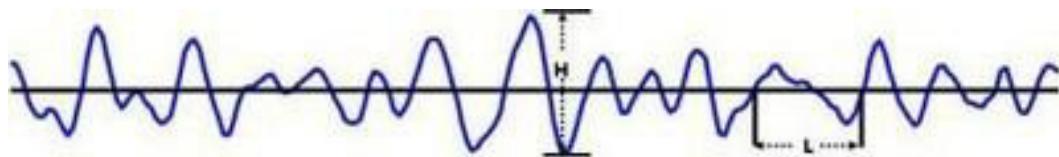
La estimación de los parámetros representativos de cada estado de mar se puede abordar de dos formas:

Análisis estadístico de las series temporales de desplazamiento de la superficie de mar

Si se registra en un punto determinado las olas. Cada ola individual en el registro se puede caracterizar por el período (tiempo transcurrido entre dos cruces consecutivos por el nivel medio del agua) y la altura (definido por la distancia desde el seno y la cresta entre cruces).

Figura 4

Ejemplo de serie temporal de desplazamiento de la superficie del mar



Nota. Adaptado de The comprehensive manual for ADCPs – Nortek.

Clasificando las olas que conforman un estado de mar por su altura y periodo, entonces se pueden obtener los siguientes parámetros:

Altura de ola significante (Hs): Promedio del tercio más alto de las alturas de olas registradas.

Altura de ola máxima (Hmáx): Valor más alto de las alturas de olas registradas.

Altura media (Hmean): Promedio de las alturas de olas registradas.

Periodo medio (Tz): Promedio de los periodos de olas registradas.

Análisis espectral de la serie temporal

El desplazamiento vertical de la superficie libre del mar en un punto determinado puede ser interpretada como la suma de infinitas ondas sinusoidales con amplitudes, periodos, fases y direcciones diferentes. Estas ondas sinusoidales cuentan con una energía distinta y su integración forman el espectro de energía.

Ecuación 1: Superficie libre

$$\eta^*(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j}^* \cos(w_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i x \sin \theta_j + \alpha_{i,j})$$

Donde:

η : nivel de la superficie libre respecto al nivel promedio.

a : amplitud

w : frecuencia

k : número de onda

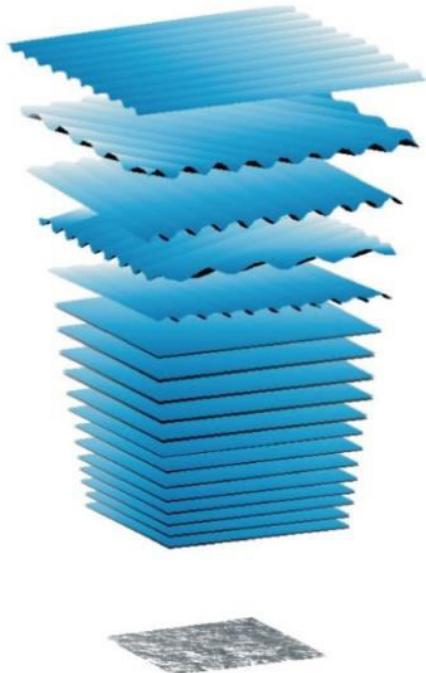
θ : dirección

α : fase

*: indica la aleatoriedad de la variable.

Figura 5

Descripción de la superficie libre del mar mediante el sumatorio de infinitas componentes sinusoidales con dirección, amplitud, periodo y fase diferentes.



Nota. Adaptado de Waves in oceanic and coastal Waters - Holthuijen 2007

3.6.1.1.3 Espectro de Energía

El espectro de energía define la distribución de energía con respecto a un rango de frecuencia y dirección. Del espectro se pueden obtener los parámetros de olas representativos de cada estado de mar a partir de los momentos espectrales. El momento espectral está definido como:

Ecuación 2: Momento espectral

$$m_i = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} f^i E(f, \theta) df d\theta$$

Donde:

f : frecuencia espectral

θ : dirección espectral

$E(f, \theta)$: Energía espectral

La altura de ola significativa espectral ($Hm0$) que es equivalente a la altura de ola significativa (Hs) se encuentra definido como:

Ecuación 3: Altura de ola significativa espectral

$$Hm0 = 4\sqrt{m0}$$

Ecuación 4: Dirección media

$$Dm = \arctan 2 \left(\frac{\int_0^{2\pi} E(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} E(\theta) \cos \theta d\theta} \right)$$

Ecuación 5: Periodo medio

$$Tz = \sqrt{\frac{m0}{m2}}$$

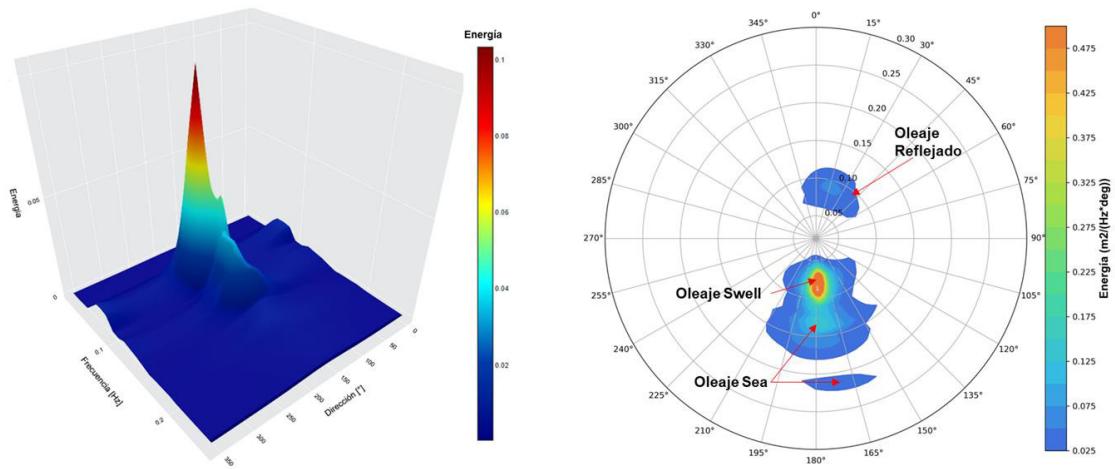
El periodo pico (Tp) y dirección pico (Dp) se obtiene del valor máximo del espectro frecuencial y direccional respectivamente.

El analizar el espectro de energía nos facilita poder interpretar la distribución de la energía de manera frecuencial y direccional, pudiendo identificar así los estados de mar más representativos en nuestra zona de estudio.

En la figura 6 se representa el espectro de un estado de mar con altura significante de 2.64 m, periodo pico 12.61 s, dirección media 168.27° y dirección pico 169.88°. Sin embargo, analizando el espectro de oleaje se obtiene más información, porque se observan tres picos de energía: un oleaje swell de 10 – 17 s de periodo, un oleaje sea (mar de viento) de 4.5 a 7 s y oleaje reflejado de 10 – 12.5 s.

Figura 6

Espectro de Oleaje 3D (Imagen izquierda) y Espectro Polar (Imagen derecha)



Nota. Elaboración propia

Por la facilidad interpretativa y por la amplia disponibilidad de instrumentos de medición no directos, el análisis espectral es el método principal para analizar y procesar los resultados de olas.

3.6.1.1.4 Características generales oleaje en el litoral peruano

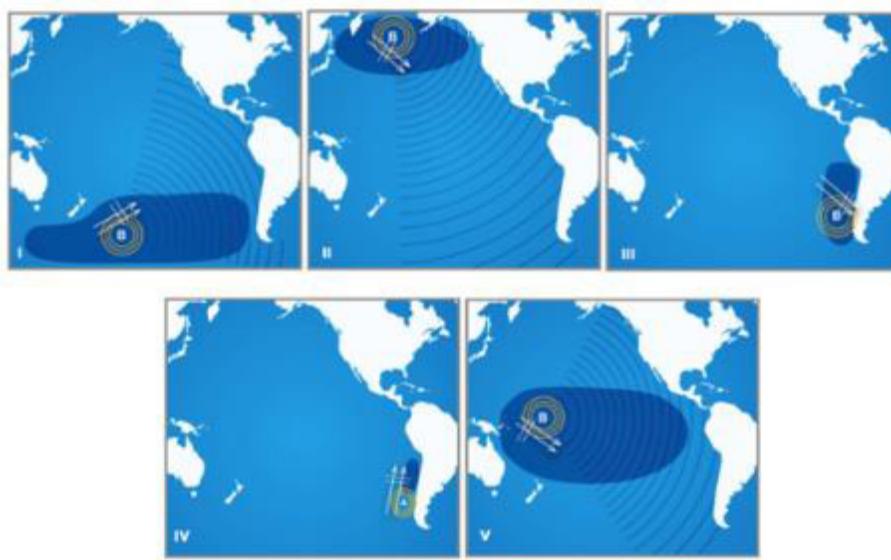
El oleaje en Perú está dominado por las borrascas extratropicales (bajas presiones) que se producen al sur del Océano Pacífico, durante prácticamente todo el año (con mayor energía en otoño e invierno) y por las borrascas extratropicales del pacífico norte (con mayor presencia en época de verano).

El oleaje llega a la costa del Perú con una dirección sur – suroeste (180° - 225°) y oeste noroeste – noroeste (292.5° – 315°) respectivamente.

Existen además otras zonas de generación menos comunes, asociadas a tormentas en latitudes tropicales, que pueden generar oleajes anómalos del oeste.

Figura 7

Zonas de generación del oleaje que llega al litoral peruano

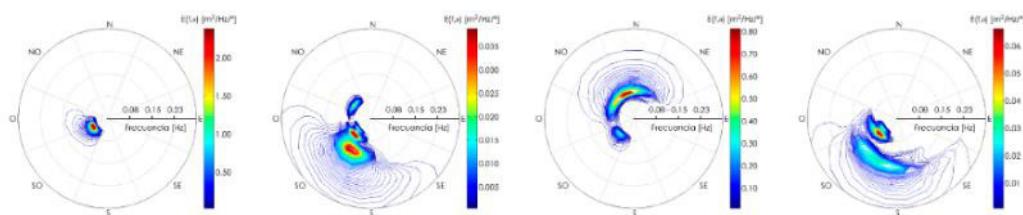


Nota. Adaptado de el atlas de clima de oleaje de Chile (2017). (<https://oleaje.uv.cl/>)

En conclusión, el oleaje en la costa del Perú es multimodal debido a que existen distintos tipos de oleajes con diferentes direcciones y características. En la figura 8 se puede visualizar distintos estados de mar bimodales (presencia de 2 tipos de oleaje) y trimodales (presencia de 3 tipos de oleajes).

Figura 8

Espectros polares de energía de estados de mar característicos del Pacífico sur. De izquierda a derecha: Espectro unimodal de un swell del SW / Espectro multimodal de un swell del NW, swell de SW y oleaje de viento del SSW / Espectro multimodal de swell del NW y swell de SSW / Espectro multimodal de un swell del SW y un oleaje de viento del SSW



Nota. Adaptado de el atlas de clima de oleaje de Chile (2017). (<https://oleaje.uv.cl/>)

3.6.1.1.5 Modificación de la energía de las olas

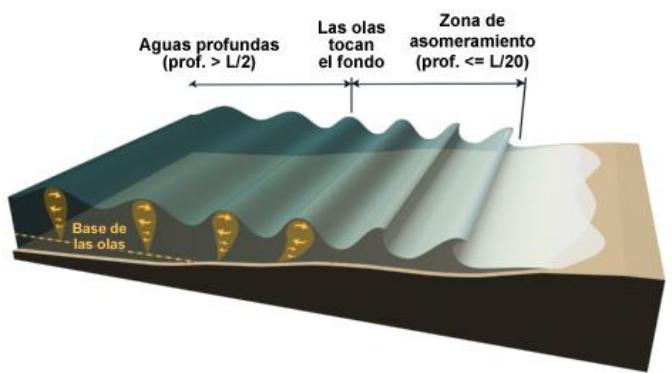
A medida que la ola proveniente de aguas profundas se acerca a la costa, su energía se modifica por distintos procesos, como: reducción de la profundidad, obstáculos naturales o artificiales en la superficie o sumergidos, etc. A continuación, se detallan los fenómenos más característicos que experimenta el oleaje.

a. Asomeramiento

A medida que la ola se aproxima a la costa, la profundidad empieza a disminuir generando que la ola reduzca su celeridad y por lo tanto su altura aumente.

Figura 9

Asomeramiento de las olas



©The COMET Program

Nota. Adaptado de Olas en aguas someras actualización de 2012 - Comet Program.

(https://www.meted.ucar.edu/marine/SWW_es/navmenu.php?tab=1&page=2-2-1&type=flash)

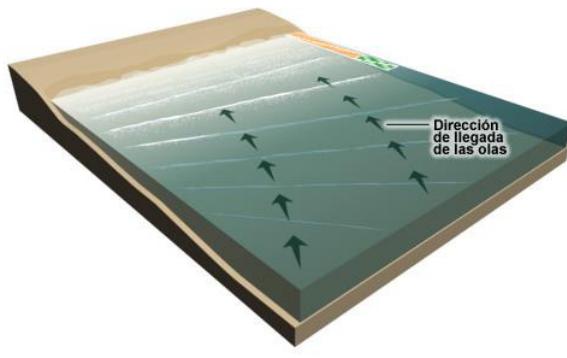
b. Refracción

Modesto (2009) indica que mientras más someras son las aguas, mayor es el efecto que el fondo produce sobre la superficie. No obstante, cuando las aguas son lo suficientemente profundas, el movimiento de la superficie libre no es capaz de afectar a las partículas de fluido más cercanas al fondo por lo que su velocidad no se ve alterada. Por esto, si la batimetría del fondo no es constante la velocidad de los distintos grupos de ondas que generan la superficie

será desigual en cada punto del dominio de propagación. La consecuencia física es que estos tenderán a girar para alcanzar una dirección de avance lo más paralela posible a la línea de máxima pendiente del fondo. Este efecto es conocido como refracción de las ondas en el mar.

Figura 10

Refracción de la ola



©The COMET Program

Nota. Adaptado de Olas en aguas someras actualización de 2012 - Comet Program.

(https://www.meted.ucar.edu/marine/SWW_es/navmenu.php?tab=1&page=2-3-1&type=flash)

c. Difracción

Según Modesto (2009) a medida que las ondas en el mar se propagan hacia profundidades más reducidas encuentra la presencia de islas, cayos, cabos u otras estructuras y artificiales.

Si la onda es muy larga en comparación con la dimensión del cuerpo con el que se topa, el área de sombra, respecto el área de incidencia, es menor. Es en esta situación donde los altos gradientes energéticos entre ambas zonas provocan una propagación perpendicular al avance del frente de olas incidente. Este efecto es denominado difracción del oleaje.

Gioc (2000) comenta que la difracción es la causante de que un fragmento de la energía transportada por la onda se transmita a las zonas de sombra creada por estos obstáculos.

Las zonas de sombra, no son más que aquellas zonas adyacentes asociadas a toda estructura en el mar, donde el oleaje no tiene efecto tras incidir en él. Al no existir propagación en estas áreas su energía es baja en comparación con los puntos de incidencia, de ahí que tales áreas

Figura 11

Difracción del oleaje incidente en el puerto de Salaverry



Nota. Elaboración propia en base a una ortofoto de Google earth.

d. Reflexión

Modesto (2009) indica que cuando una onda al propagarse incide sobre cierto contorno y este refleja total o parcialmente la energía de una onda incidente se produce la reflexión del oleaje, un cambio de dirección de propagación que depende directamente del ángulo de incidencia.

Del mismo modo todo objeto tiene coligada una zona de sombra. Si las dimensiones del obstáculo son considerablemente mayores que la longitud de la onda que le incide, la zona de sombra es casi total y el efecto más evidente es la reflexión.

3.6.1.1.6 Rotura de Oleaje

Gioc (2000), a medida que las ondas se propagan hacia la costa se asoman aumentando su altura de ola progresivamente. Sin embargo, este aumento no es ilimitado sino que a una profundidad determinada, una onda de características dadas se vuelve inestable hasta que rompe disipando una enorme cantidad de energía en forma de turbulencia, fundamentalmente. En definitiva, las olas rompen cuando alcanzan un estado crítico en su movimiento que está afectado por la configuración del fondo, así como por otros factores, a continuación, se detallan los tipos de rotura:

Spiling (Decrestamiento): Se produce cuando las olas empiezan a romper a una distancia relativamente grande de la costa y rompen gradualmente a medida que se acercan progresivamente a aguas someras. En el momento que la ola rompe, se desarrolla una línea de espuma en la cresta y deja una fina capa de espuma en una distancia considerable.

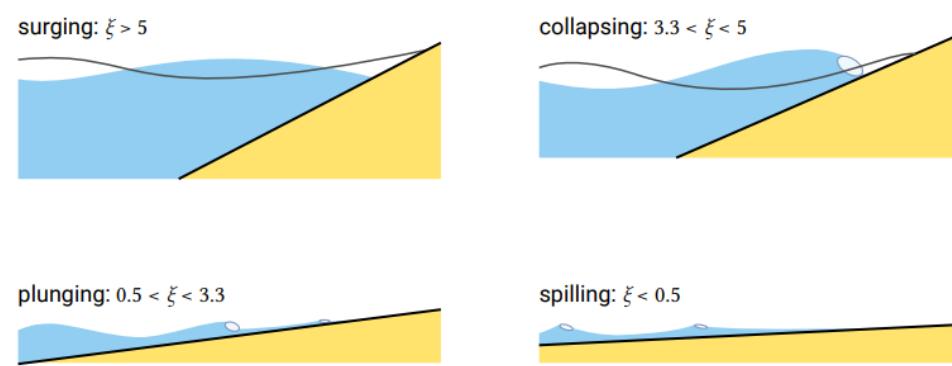
Plunging (Voluta): Este tipo de rotura se presenta en playas de pendiente moderada. Cuando la cresta se rompe sobre la parte inferior de la ola, se disipa mucha energía en turbulencia. Parte de la energía se refleja de vuelta al mar y otra parte se dirige hacia la costa, mientras se forma una nueva ola.

Collapsing (Colapso): La rotura collapsing ocurre en playas con pendientes pronunciadas. Las olas rompen cuando llegan a la playa sin perder energía, desplazándose a gran distancia por la playa y con bastante fuerza.

Surging (Oscilación): Ocurre a lo largo de costas bastante empinadas para olas con una longitud de ola amplias. Las olas suben y bajan por la pendiente con un ligero arrastre de aire. La zona de rompiente es muy estrecha y más de la mitad de la energía se refleja en aguas más profundas.

Figura 12

Tipos de rotura



Nota. Adaptado de Coastal Dynamics - Judith Bosboom and Marcel J.F. Stive.

3.6.1.2 Modelo Numérico Mike 21SW

Mike21SW es un software desarrollado por la compañía DHI. Es un modelo espectral de oleaje que simula el crecimiento, decaimiento y transformación de olas locales generadas por viento y olas oceánicas. Este modelo puede resolver los siguientes procesos: Generación de olas por las fuerzas inducidas por el viento, interacción no lineal de olas, disipación por decrestamiento (whitecapping), disipación por fricción de fondo, disipación por rotura de ola en zonas de poca profundidad, Refracción y asomeramiento por variación de profundidad y corrientes, interacción ola-corrientes, efecto de variación temporal de profundidad y corrientes, efecto de cobertura de hielo en el campo de olas, difracción de olas (parametrizado), reflexión de olas (parametrizado). Debido a que utiliza una malla de cálculo en elementos finitos, irregular y flexible, MIKE 21SW es particularmente recomendable para la modelación de olas a escala regional y local simultáneamente; utilizando una malla de resolución espacial gruesa para la representación regional y una malla de mayor resolución para representar el ambiente cercano a la costa y a las estructuras a modelar.

La ecuación que gobierna el modelo se encuentra basado en un espectro de densidad de oleaje, siendo su ecuación:

Ecuación 6: Densidad Espectral

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E}{\sigma}$$

Donde:

σ : parámetro de fase independiente (frecuencia angular relativa)

θ : Dirección del oleaje

La propagación de oleaje se puede realizar mediante dos tipos de formulaciones: desacoplamiento direccional y espectro completo. Ambas formulaciones se basan en la

ecuación de conservación de la acción de las olas y son apropiadas para los procesos que se presentan cerca a costa.

La ecuación de balance de acción de las olas se formula en coordenadas cartesianas o esféricas.

Ecuación 7: Balance de acción de las olas

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

Donde:

N : Densidad de acción del oleaje.

t : tiempo.

\bar{v} : Es la velocidad de propagación del grupo de ondas en las cuatro dimensiones.

σ : Fuente para la ecuación de balance de energía.

S : Diferencia en las cuatro dimensiones.

3.6.1.3 Dinámica litoral.

La dinámica litoral es el conjunto de procesos costeros generados por los agentes climáticos marinos (viento, oleaje, variaciones del nivel del mar y corrientes) al actuar sobre los sedimentos de la zona costera.

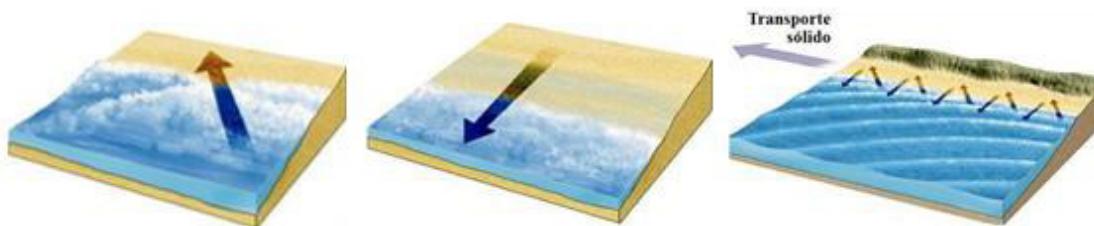
El oleaje es el agente principal de la dinámica litoral y se genera por la acción del viento transfiriendo energía a la masa oceánica. Las olas se forman donde el viento ha estado soplando con alta velocidad (zonas de bajas y altas presiones), en una misma dirección y durante largo tiempo, produciéndose esa transmisión de energía del aire al agua. Luego las olas se propagan desde el área donde fueron generadas, pudiendo recorrer miles de kilómetros antes de perder su energía, normalmente en la costa. Durante su propagación las

olas se modifican por efecto principalmente de la transferencia de energía entre ondas, disipación por fondo, refracción, difracción, asomeramiento y reflexión.

Al llegar a la costa, el oleaje disipa su energía generando corrientes de rotura que hacen que los sedimentos se desplacen de un lugar a otro. Así, un oleaje incidiendo de manera oblicua a la línea de costa produce un transporte de sedimentos en su sentido de avance y posteriormente un movimiento de retroceso en sentido perpendicular a la costa. Se tiene así un movimiento zigzagueante de avance del sedimento, con una corriente y transporte de sedimentos longitudinal (también conocido como deriva litoral) y una corriente y transporte de sedimentos transversal.

Figura 13

Corrientes y transporte de sedimentos ocasionados por la rotura de oleaje



Nota. Adaptado de estructuralia

Así, el oleaje es el responsable del arrastre de sedimentos a lo largo de la franja costera entre la línea de rompientes y la línea de orilla. Pero adicionalmente se debe considerar:

- El desplazamiento de las partículas más finas por la acción directa del viento soplando sobre superficie terrestre.
- El transporte de las partículas cohesivas (limos y arcillas) que se encuentran en suspensión en la columna de agua, originado por las corrientes de viento, mareales, de densidad o fluviales /estuarinas.

3.6.1.3.1 Conceptos Teóricos Análisis en Planta Tramo Costero.

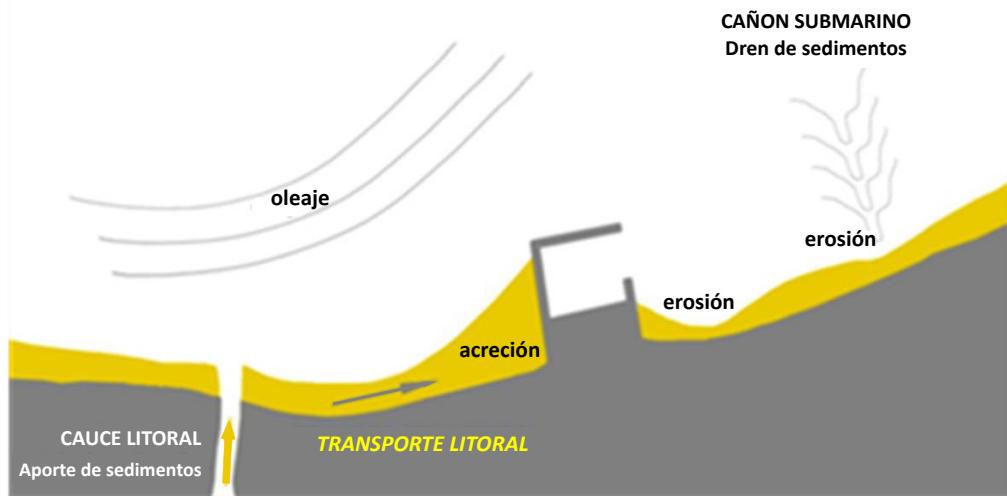
Para analizar la planta de una playa es necesario estudiar el balance sedimentario, el cual es la cantidad entrante y la cantidad saliente de sedimentos para poder determinar si se encuentra en equilibrio, en erosión o en acumulación. La fuente de sedimento principal en un tramo litoral es el aporte fluvial y en menor medida la erosión de acantilados, depósitos de conchas marinas o el viento soplando desde tierra hacia mar. Y el oleaje con las variaciones del nivel del mar es el principal agente que desplaza el sedimento.

Este comportamiento de la playa, indica que siempre se le debe considerar como un medio dinámico, que se mantiene cambiante y en evolución, siendo las playas encajadas las más estables. Sin embargo, la playa no es un elemento aislado, sino que forma parte de un tramo y una franja de costa; en la que cualquier cambio en la dinámica litoral antes descrita en un punto afecta al resto, con mayor o menor importancia.

En la siguiente imagen se representa lo indicado en el párrafo anterior, con el ejemplo de un tramo teórico de litoral con incidencia oblicua del oleaje. Si se producen regulaciones en el cauce fluvial (captaciones de agua o represas), transformaciones de su lecho (canalización) o modificaciones en los terrenos de su cuenca de escorrentía (agricultura intensiva, desarrollo urbano, etc.) se producirá una reducción de aporte de sedimentos y un desbalance sedimentario. Y si se construyen obras que impidan el transporte longitudinal litoral (puertos y diques) o que impidan el transporte transversal (ocupación de la zona de inundación de la playa con edificaciones o rigidizaciones del tramo con muros o escolleras de protección) de igual manera se producirá un desbalance.

Figura 14

Esquema del comportamiento en planta de un tramo teórico de litoral



Nota. Adaptado de la elaboración propia INMAR.

3.6.1.3.2 Tasa de Transporte de Sedimentos.

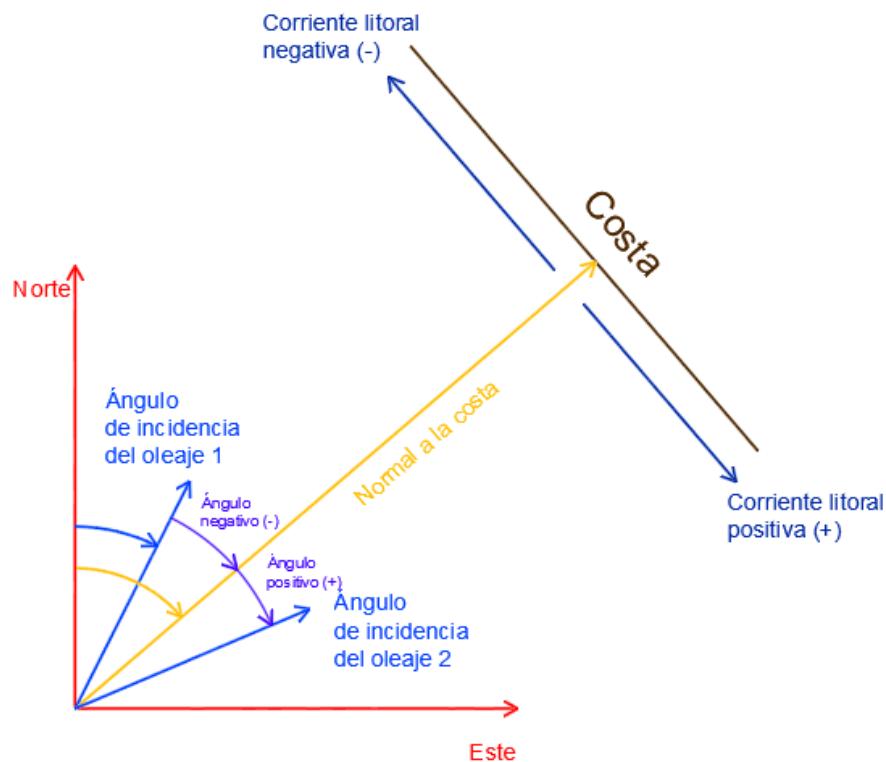
La obtención de la tasa del transporte de sedimentos en dirección longitudinal a la costa como consecuencia de las corrientes inducidas por la rotura del oleaje es fundamental para el correcto conocimiento de la dinámica litoral del tramo de costa que se está considerando en el presente estudio.

El empleo de formulaciones analíticas es probablemente el método más empleado por su sencillez y rápida implementación. Sin embargo, hay que ser cuidadoso en escoger la formulación empírica más adecuada, pues su rango de validez se ciñe a playas con características similares a las usadas para la obtención y calibración de cada fórmula. Además, todas las formulaciones son muy sensibles a las variaciones en los parámetros de los que dependen (orientación de la costa, flujo medio de energía o diámetro medio de sedimentos).

El ángulo de la ola propagada está definido respecto al norte geográfico tal como se indica en la Figura 15. Similarmente, el ángulo normal a la costa está definido respecto al norte geográfico.

Figura 15

Definición del ángulo de propagación de las olas con respecto a la costa.



Nota. Elaboración propia.

La fórmula más conocida para el transporte longitudinal de sedimentos es la ecuación CERC (Shore Protection Manual, US Army Corps of Engineers, 1984). Este método se basa en el principio de que el transporte de sedimentos es proporcional a la potencia de las olas costeras por unidad de longitud de playa; la proporcionalidad depende de un coeficiente de calibración. La fórmula CERC fue calibrada utilizando datos de campo de playas de arena. No tiene en cuenta el tamaño de las partículas ni la pendiente de la playa y sólo es válida para condiciones arenosas.

Kamphuis (1991) estudió sistemáticamente los efectos del diámetro de las partículas y la pendiente del lecho, resultando una ecuación más refinada para el transporte de longitudinal de sedimentos. La fórmula de Kamphuis es válida para playas de arena, pero no está ajustada para playas de grava y guijarros. Se descubrió que la fórmula de Kamphuis proporciona la mejor concordancia entre las tasas de transporte calculadas y medidas según el trabajo de Schoonees y Theron (1993, 1996). Recientemente, Mil-Homens et al. (2013) han realizado una reevaluación de la fórmula de Kamphuis basada en un extenso conjunto de 250 puntos de datos. La mayoría de los puntos de datos se encuentran en el rango de arena (<0,6 mm) y en el rango de transporte bajo (condiciones de olas suaves).

Ecuación 8: Fórmula de Kamphuis Modificada -2013 (m³/s)

$$Q_l = \frac{0.0013}{(1-n)(\rho_s - \rho)} * \frac{\rho * H_{br}^3}{T_p} * \tan \beta_{br}^{0.75} * \left(\frac{H_{br}}{L_o}\right)^{-1.25} * \left(\frac{H_{br}}{D_{50}}\right)^{0.25} * \text{sen}(2 * \theta_{br})^{0.6}$$

Donde:

θ_{br} : Ángulo de incidencia de la ola (normal a la costa) en la zona de rompiente.

H_{br} : Altura de ola en el punto de rotura.

L_o : Longitud de la ola incidente.

n : Porcentaje de porosidad.

ρ : Densidad aparente del fondo.

ρ_s : Densidad del sedimento.

$\tan \beta_{br}$: Pendiente de la playa hasta la zona de rompiente.

T_p : Periodo pico.

D_{50} : Diámetro medio del sedimento.

Ecuación 9: Fórmula del ángulo de incidencia de la ola (normal a la costa) en la zona de rompiente.

$$\theta_{br} = \arcsen\left(\left(\frac{C_{br}}{C_o}\right) * \operatorname{Sen}\theta_o\right)$$

θ_o : Ángulo de incidencia de la ola (normal a la costa) en aguas profundas.

C_o : Velocidad de propagación de las olas en aguas profundas.

C_{br} : Velocidad de propagación de las olas en la zona de rompiente.

Finalmente, se tiene a la fórmula desarrollada por Van Rijn (2014), que es una expresión general para el cálculo del transporte costero de arena, grava y bolos (0,1 a 100 mm). Que también incluyen los efectos de las corrientes adicionales debidas a la marea y el viento.

Ecuación 10: Fórmula de Van Rijn -2013 (m³/s)

$$Q_l = K_o * K_{swell} * \rho * D_{50}^{-0.6} * K_{slope}^{0.4} * H_{br}^{2.5} * \frac{V_{eff}}{[(1-n) * \rho_s]}$$

Donde:

K_o : Factor transporte litoral (valor por defecto =1)

K_{swell} : Factor de corrección en aguas profundas (swell), para mar de viento ($K_{swell}=1$)

K_{slope} : Factor de corrección de la pendiente. (valor por defecto=1)

D_{50} : Diámetro medio del sedimento

H_{br} : Altura de ola en el punto de rotura.

n : Porcentaje de porosidad

ρ : Densidad aparente del fondo

ρ_s : Densidad del sedimento

V_{eff} :
$$V_{eff} = \left(V_{wave}^2 + V_{tide}^2 \right)^{0.5}$$
 : Velocidad de la corriente litoral con velocidades de marea y de oleaje en la misma dirección (en caso de ser opuestas se toma un signo negativo).

V_{wave} :
$$0.3 * (9.81 * H_{br})^{0.5} * \sin(2 * \theta_{br})$$
 : Velocidad longitudinal inducida por el oleaje.

V_{tide} : Velocidad longitudinal producida por la marea (se opta por el valor de 0, 0.1, 0.3 y 0.5 m/s para casos de sin marea, micro mareas, meso mareas y macro mareas respectivamente).

Como veremos en capítulos posteriores el tramo de estudio está compuesto por guijarros y cantos rodados, la fórmula del CERC y Kamphius no son aplicables. La fórmula de Van Rijn es la más adecuada y es la que se ha utilizado para estimar la tasa de transporte longitudinal, aunque también se ha utilizado la fórmula de Kamphius modificada en 2013 (que, aunque fue testada mayoritariamente con datos de playas de arena, también consideró playas de granulometría más gruesa).

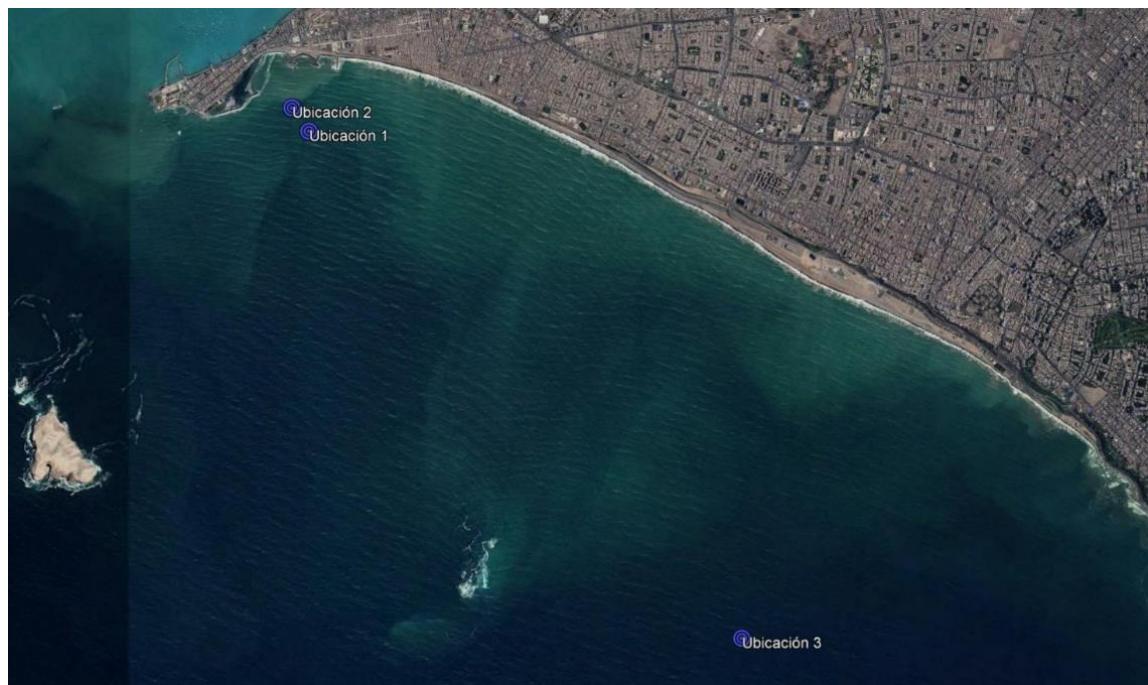
3.6.1.4 Datos de Olas Registrados en la Zona de Estudio.

Los datos de olas fueron registrados por un equipo ADCP de la marca Nortek modelo Awac 600 KHz, el cual es un perfilador acústico que mide oleaje direccional y perfiles de corrientes.

Se utilizaron datos registrados por dos equipos ADCP, estos equipos fueron de la empresa INMAR y GAPASH, el ADCP de INMAR fue instalado en la ubicación 1 y 2 (Figura 16) mientras que el ADCP de la empresa GAPASH se instaló en la ubicación 3, a continuación, se muestra la ubicación y los periodos de medición de ambos ADCP:

Figura 16

Ubicación de los equipos ADCP AWAC



Nota. Elaboración propia en base a una ortofoto de Google earth.

Tabla 1

Ubicación ADCP

| Ubicación | Periodo | |
|-----------|------------------|------------------|
| | Inicio | Final |
| 1 | 4/07/2019 16:00 | 20/07/2019 10:00 |
| | 6/09/2019 15:00 | 14/10/2019 10:00 |
| 2 | 20/07/2019 12:00 | 6/09/2019 09:00 |
| 3 | 13/04/2019 14:00 | 15/05/2019 08:00 |

Nota. Elaboración propia.

Con los datos de olas registrados por los equipos ADCP se ha elaborado las siguientes gráficas para tener un panorama del comportamiento del clima de olas en el área de estudio.

Figura 17

Gráficas de Histograma H_s , T_p , Dm y Dp y Rosas de oleaje H_s vs Dm y H_s vs Dp – Primera Ubicación

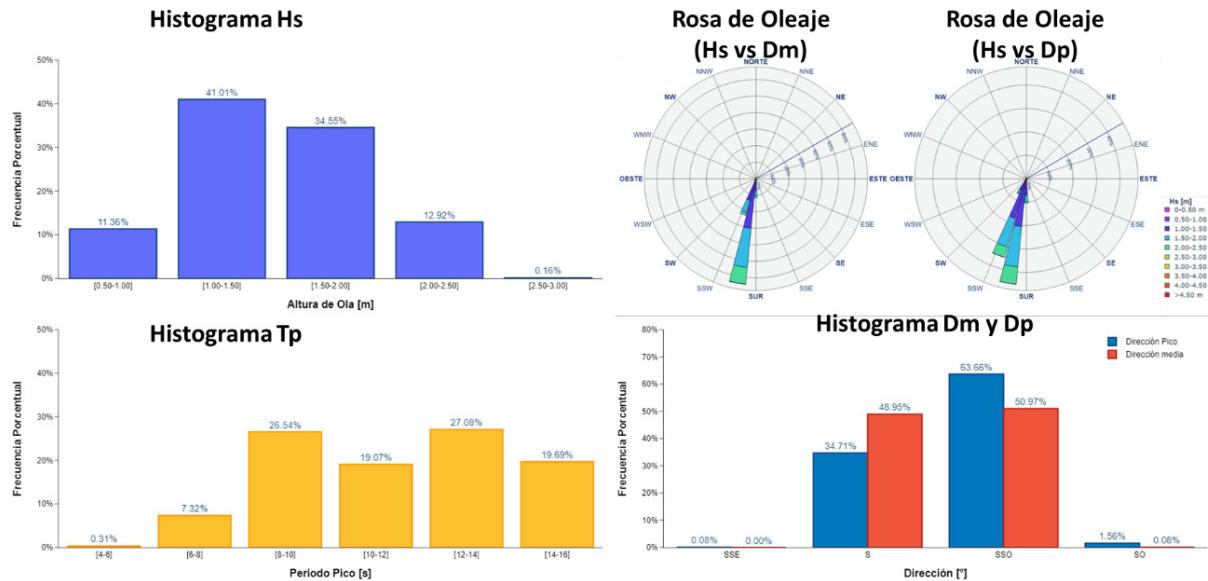


Figura 18

Gráficas de Histograma H_s , T_p , Dm y Dp y Rosas de oleaje H_s vs Dm y H_s vs Dp – Segunda Ubicación

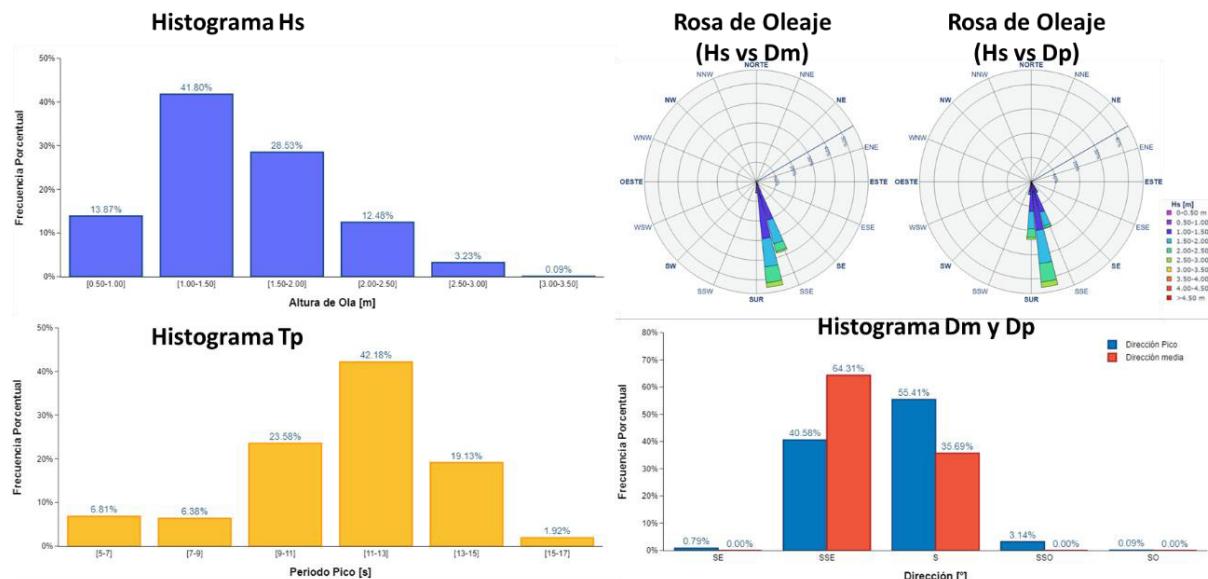
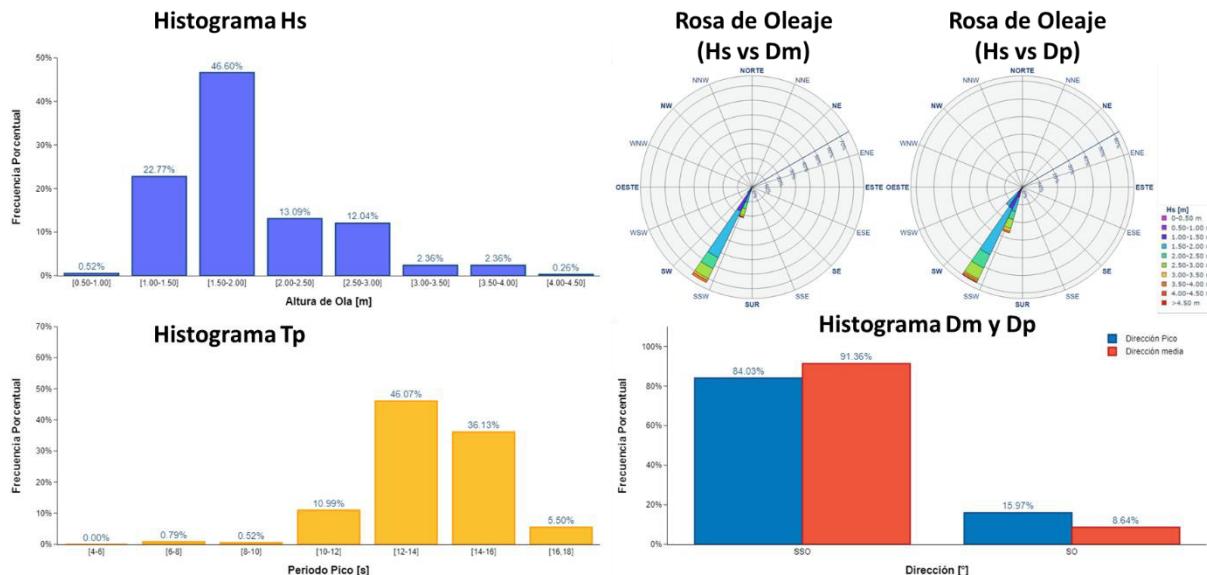


Figura 19

Gráficas de Histograma Hs, Tp, Dm y Dp y Rosas de oleaje Hs vs Dm y Hs vs Dp – Tercera Ubicación



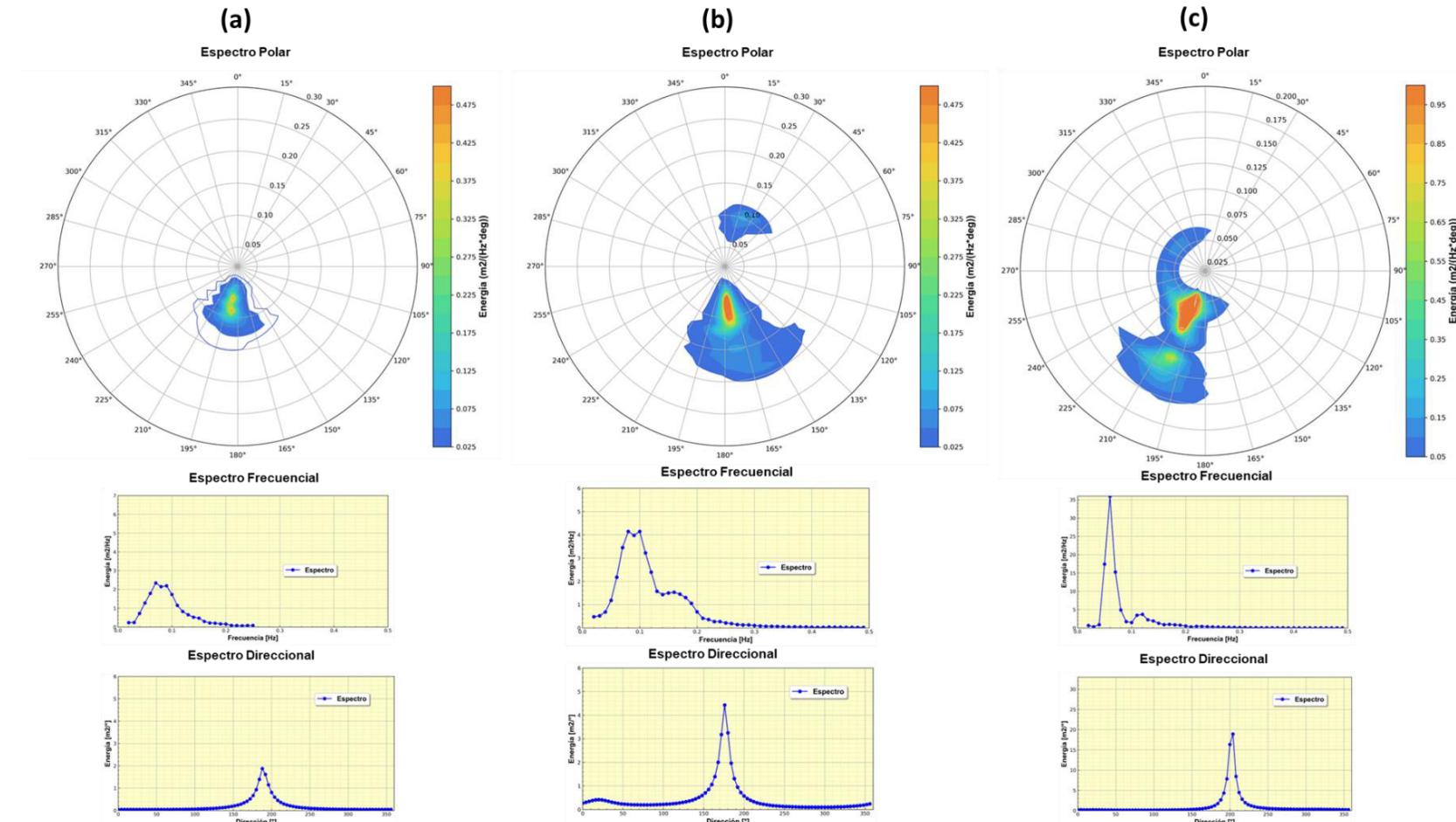
De las figuras podemos comentar lo siguiente:

- Para la primera ubicación, los valores máximos de Hs se encuentran dentro del rango 2.50 – 3 m y su periodo pico presenta máximos en el rango de 14 – 16s.
- Para la segunda ubicación, los valores máximos de Hs se encuentran dentro del rango 3 – 3.5 m y su periodo pico presenta máximos en el rango de 15 – 17s.
- Para la tercera ubicación, los valores máximos de Hs se encuentran dentro del rango 3.5 – 4 m y su periodo pico presenta máximos en el rango de 16 – 18s.
- La tercera ubicación presenta valores de Hs mayores a la primera y segunda ubicación debido a que se encuentra más expuesta al oleaje mientras que la primera y segunda ubicación se encuentra abrigado parcialmente por la isla san lorenzo.
- En las 3 ubicaciones se puede visualizar que existe un bajo porcentaje de periodos pico menores a 8 s, lo que corresponde a un oleaje local de viento.
- De las rosas de oleaje e histogramas de dirección, tanto para las tres ubicaciones se puede visualizar que la distribución porcentual es distinta en la Dm y Dp, lo que nos indica que existen oleajes superpuestos en la zona.

De acuerdo con las conclusiones realizadas a las mediciones en las tres ubicaciones, los parámetros representativos de los estados de mar no permiten distinguir los estados de mar multimodales característicos del océano pacífico. Es por ello por lo que se han elaborado espectros frecuenciales, direccionales y polares de todos los estados de mar para poder identificar los diferentes oleajes superpuestos. Se presentan a continuación algunos espectros de oleaje representativos que nos permite analizar la multimodalidad:

Figura 20

Gráficas de espectros polares, frecuenciales y direccionales



Nota. (a) Espectro de la primera ubicación, (b) Espectro de la segunda ubicación y (c) Espectro de la tercera ubicación, elaboración propia.

En la figura 20 (a) se puede apreciar que la mayor parte de energía se encuentra en el rango direccional de 180° a 195° , siendo su dispersión direccional de 150° a 225° .

De su espectro frecuencial podemos apreciar dos picos de energía con periodos de 11 s y 14.5 s, correspondientes a 2 oleajes de tipo swell.

De la figura 20 (b) se puede apreciar que la mayor parte de energía se encuentra en el rango direccional 165° a 180° . Pero también se observa un oleaje reflejado proveniente del rango direccional 0° a 45° con periodos que oscilan entre 10 – 20 s.

De su espectro frecuencial podemos apreciar dos picos de oleaje correspondientes a un oleaje swell (pico mayor) y un oleaje tipo sea (pico menor).

De la figura 20 (c) se puede apreciar que la mayor parte de energía se encuentra en el rango direccional de 195° a 225° . Pero también se observa un oleaje reflejado proveniente del norte con un rango direccional 285° a 330° con periodos que oscilan entre 14.2 s a 20 s.

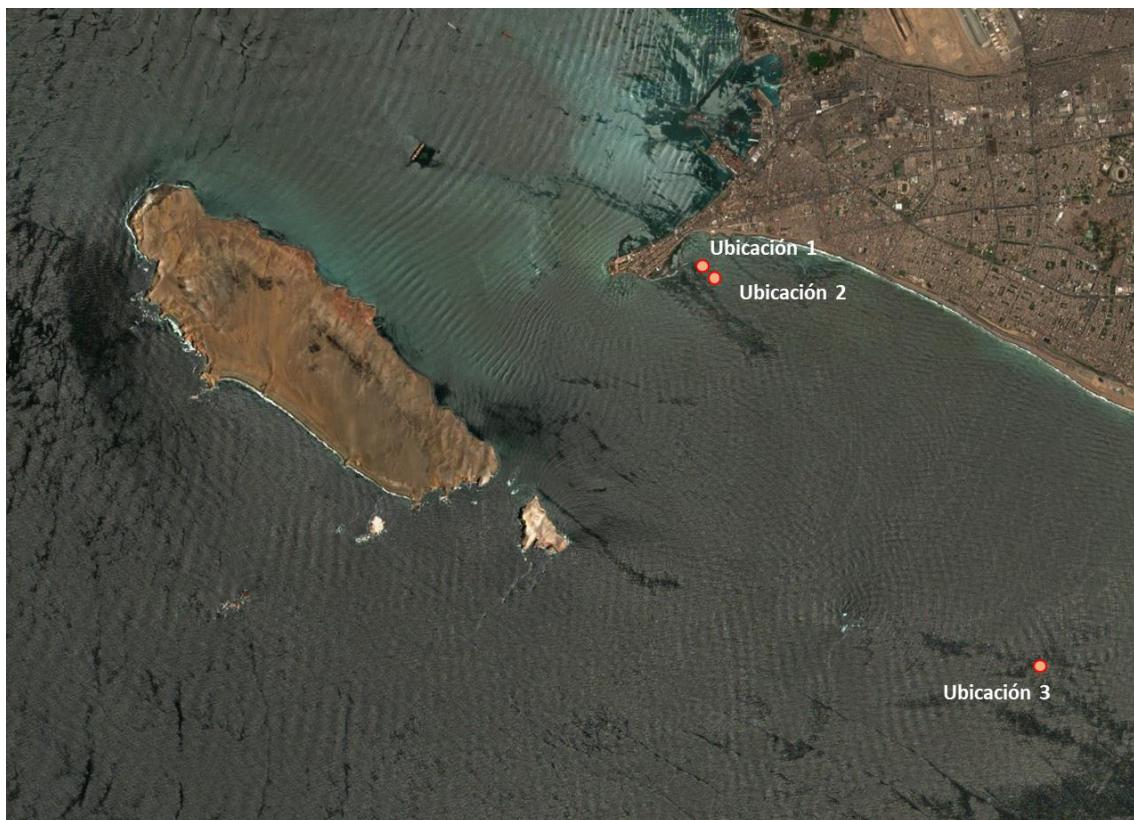
De su espectro de frecuencia podemos apreciar dos picos de energía, el pico mayor se encuentra asociado a un oleaje swell mientras que el pico menor ($T_p = 7.7$ s) corresponde a un oleaje de viento local.

Del análisis de los espectros de oleaje y apoyándonos en la siguiente ortofoto, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los oleajes tipo swell provenientes del sur sufren importantes transformaciones.
- Se puede apreciar la multimodalidad en la bahía de Miraflores identificándose oleaje proveniente del sur y del norte.
- Existe oleaje reflejado siendo más intenso a medida que se encuentre más cerca a costa.

Figura 21

Ortofoto Google earth - Fecha 18/01/2022



Nota. En la imagen se puede visualizar los distintos frentes de oleaje provenientes del sur y el norte.

3.6.1.5 Clima de Olas en Aguas Profundas.

Para caracterizar el clima de olas en aguas profundas se ha adquirido información de la base de datos de reanálisis de oleaje espectral del pacífico sur y central CSIRO. Esta base se encuentra calibrada con boyas y satélites.

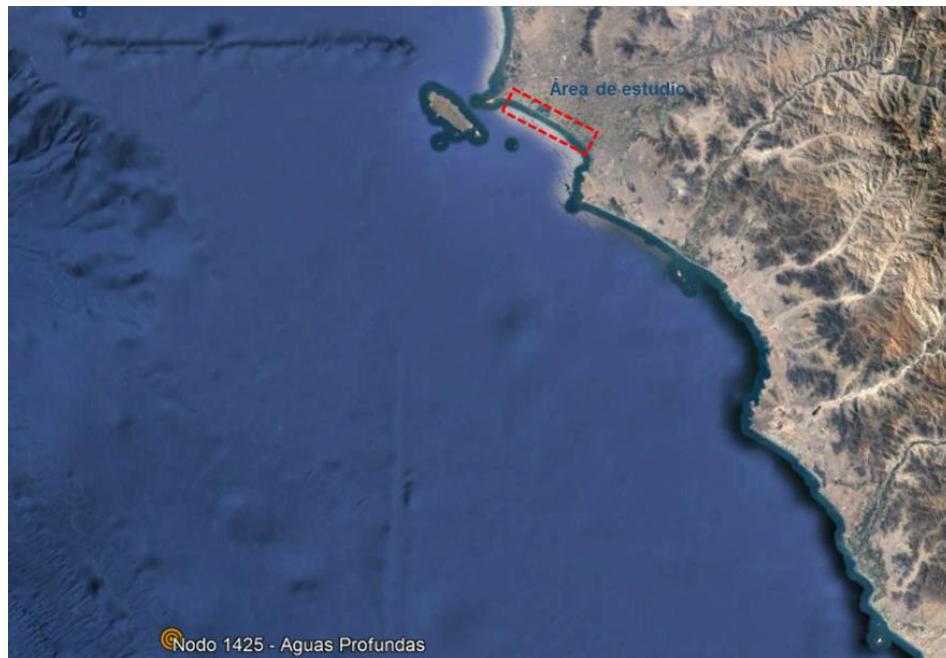
Los datos de oleaje en aguas profundas cuentan con datos horarios dentro del periodo de enero de 1979 hasta marzo del 2022 (43 años), la serie de datos cuenta con los parámetros de: altura de ola, periodo pico, dirección media y dirección pico.

Dentro de los nodos existentes en la base de datos de CSIRO se escogió el nodo 1425 proporcionado por la empresa INMAR, ubicado a una profundidad superior a 500 metros

garantizando que ningún estado de mar presente alguna transformación por efectos del fondo marino.

Figura 22

Ubicación nodo aguas profundas



Posteriormente se elaboró gráficas representativas para obtener un panorama del oleaje en aguas profundas.

Figura 23

Gráficas de Histograma Hs, Tp, Dm y Dp y Rosas de oleaje Hs vs Dm y Hs vs Dp – Nodo CSIRO

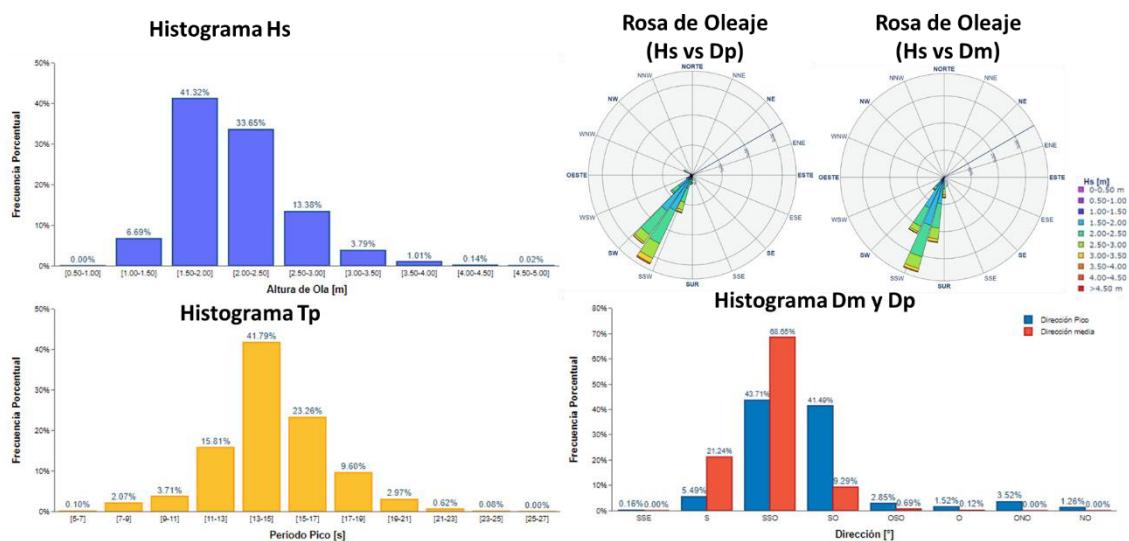


Tabla 2

Valores mínimos, percentil 25%, 50%, 75% y máximo de los parámetros de Hs, Tp, Dm y Dp.

| | Hs | Tp | Dm | Dp |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| min | 0.914 | 5.236 | 169.500 | 159.000 |
| 25% | 1.758 | 13.158 | 192.600 | 207.000 |
| 50% | 2.022 | 14.493 | 200.000 | 214.000 |
| 75% | 2.364 | 15.873 | 207.000 | 222.000 |
| máx | 4.952 | 26.316 | 284.000 | 309.000 |

Nota. Elaboración propia, min=mínimo y máx=máximo

3.6.1.6 Modelamiento de Propagación de Oleaje.

En esta sección se describirá la configuración del modelo de propagación de oleaje y su validación.

3.6.1.6.1 Modelo de terreno

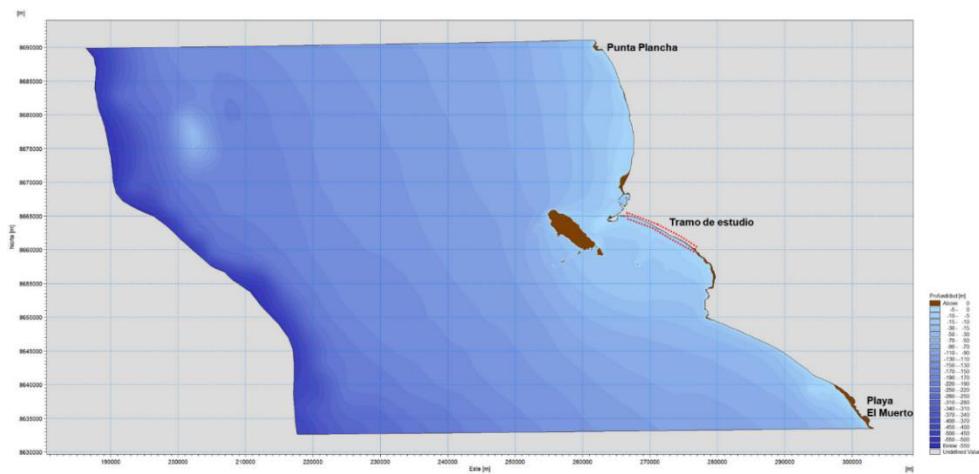
El dominio del modelo terreno se extiende de sur a norte desde playa el muerto (Punta Hermosa) hasta Punta Plancha (Ventanilla) y por el lado oeste a este desde la profundidad de 600 metros hasta el borde costero (Figura 24). El modelo presenta un área extensa con el fin de reproducir los fenómenos de refracción, difracción y asomermaniento existentes en la zona de estudio.

El modelo de terreno se elaboró con las siguientes informaciones:

- Carta Náutica HIDRONAV 223 Bahía Ancón hasta Pachacamac
- Carta Náutica HIDRONAV 2235 Puerto del Callao
- Batimetría desarrollada en el área de estudio (año 2013) elaborado para el expediente técnico de obra – GORE CALLAO.
- Batimetría realizada por la empresa INMAR en la zona de carpayo (2019)

Figura 24

Modelo de terreno generado para modelamientos de oleaje



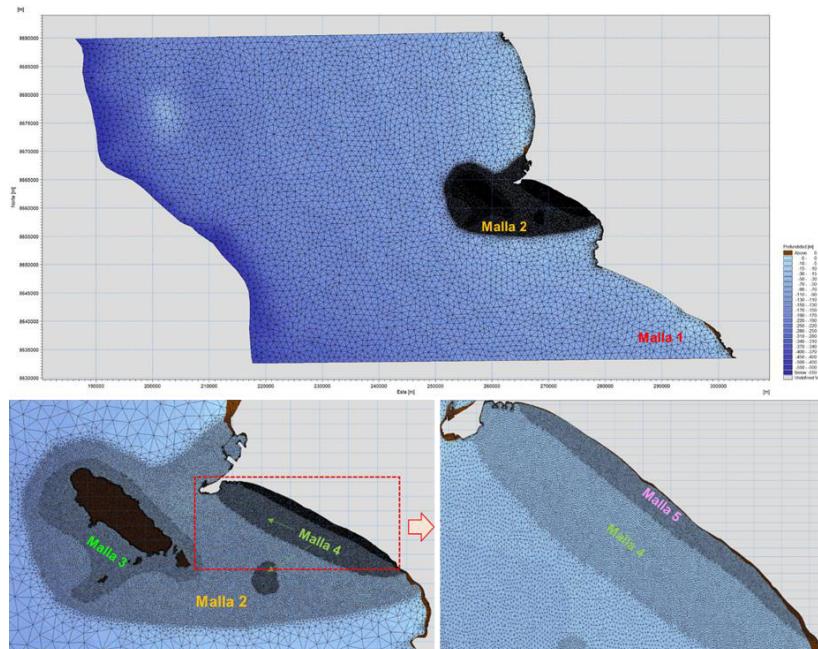
3.6.1.6.2 Mallado

El modelo consta de una malla triangular flexible con diferente grado de resolución (Figura 25), incrementando la resolución a medida que nos acercamos al tramo costero.

A continuación, se especifica la dimensión de las mallas utilizadas: Malla 1: 900x900 m, Malla 2: 200x200 m, Malla 3: 80x80 m, Malla 4: 50x50 m, Malla 5: 30x30 m.

Figura 25

Malla general flexible generado modelo MIKE 21 SW para propagación hasta aguas poco profundas



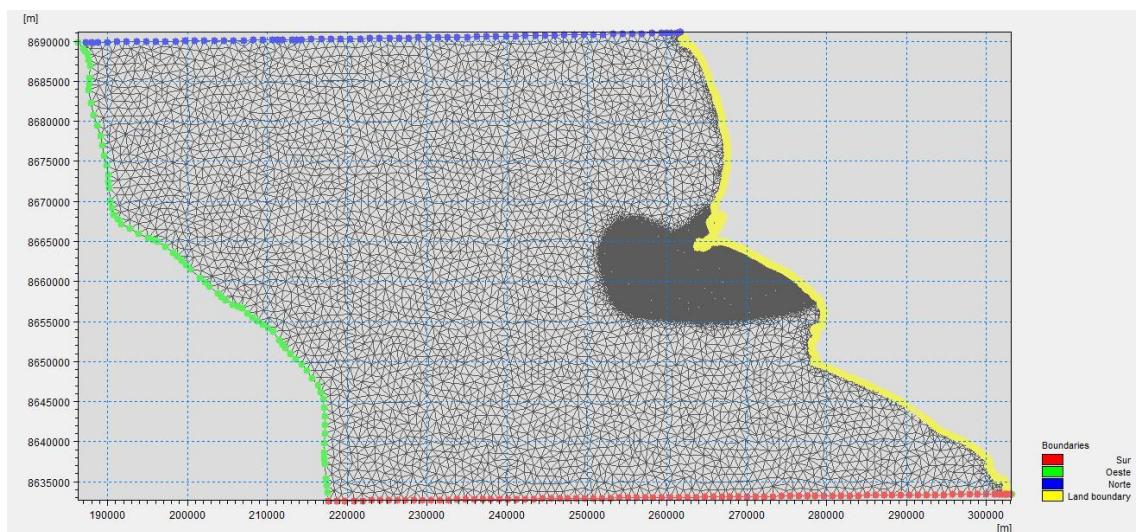
3.6.1.6.3 Condiciones de Contorno

Se establecieron 3 Contornos en el modelo numérico denominados Norte, Oeste y Sur (Figura 26), las condiciones de contorno constan de los siguientes parámetros: altura de ola, periodo pico, dirección de la ola y la dispersión direccional.

Los parámetros introducidos en el modelo varían dependiendo del análisis que se realice en el modelo.

Figura 26

Bordes de la malla del Modelo



Para la obtención del clima de olas en nuestra zona de estudio se han modelado los siguientes casos:

a. Casos Paramétricos

Para caracterizar y explicar el oleaje en la zona de estudio se han modelizado 18 casos de estados de mar en las direcciones principales (S, SSO, SO, OSO, O, ONO). Para cada una de estas 6 direcciones se han modelizado 3 situaciones: el oleaje medio para simular las condiciones promedio, el oleaje asociado a una probabilidad de excedencia de 12h/año (H_{s12}) que puede considerarse un temporal de carácter anual, y el oleaje extremal para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 3

Casos paramétricos condiciones promedio, máximos anuales y extremales.

| | Casos | Hs | Tp | Dir |
|--------------------------|---------|------|-------|-------|
| Condición promedio | Caso 1 | 2.32 | 9.43 | 180.0 |
| | Caso 2 | 2.14 | 14.29 | 202.5 |
| | Caso 3 | 1.96 | 14.49 | 225.0 |
| | Caso 4 | 1.76 | 14.71 | 247.5 |
| | Caso 5 | 1.75 | 15.63 | 270.0 |
| | Caso 6 | 1.71 | 16.39 | 292.5 |
| Máximos anuales | Caso 7 | 4.50 | 10.30 | 180.0 |
| | Caso 8 | 4.14 | 16.62 | 202.5 |
| | Caso 9 | 3.71 | 17.54 | 225.0 |
| | Caso 10 | 3.24 | 18.71 | 247.5 |
| | Caso 11 | 2.91 | 19.28 | 270.0 |
| | Caso 12 | 2.82 | 19.23 | 292.5 |
| Extremales (Tr=100 años) | Caso 13 | 5.00 | 11.11 | 180.0 |
| | Caso 14 | 5.10 | 17.24 | 202.5 |
| | Caso 15 | 5.20 | 18.64 | 225.0 |
| | Caso 16 | 3.68 | 17.54 | 247.5 |
| | Caso 17 | 3.29 | 18.53 | 270.0 |
| | Caso 18 | 3.29 | 18.48 | 292.5 |

b. Casos para la reconstrucción del clima de olas

El procedimiento para trasladar el oleaje desde aguas profundas a los puntos establecidos se basa en la obtención de una malla de valores de coeficientes de propagación y direcciones de oleaje, para los valores de altura de ola, dirección y periodo seleccionados.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se propagaron 720 casos, tomando valores de alturas de olas (Hs) de 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5m, periodos pico (Tp) de 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25 y 27s y las direcciones de S, SSO, SO, OSO, O y ONO.

Una vez propagados estos casos, con los valores obtenidos se realizó una interpolación bicúbica y se reconstruyó la serie de oleaje en las ubicaciones donde fueron instalados los equipos ADCP's y en los 12 puntos (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9, TS10, TS11 y

TS12) que se encuentran ubicados lo más cercano a la zona de rompiente y que serán utilizados para el cálculo de la tasa anual de transporte potencial longitudinal de sedimentos.

En las figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 y 44 se muestran las propagaciones de oleaje realizadas. En las figuras se puede visualizar las isolíneas de altura de ola, el vector de dirección y la ubicación de los puntos de reconstrucción paralelos al borde costero del tramo de estudio.

Figura 27

Propagación de oleaje con dirección Sur (180°), condición promedio ($H_s=2.32m$, $T_p=9.43s$).

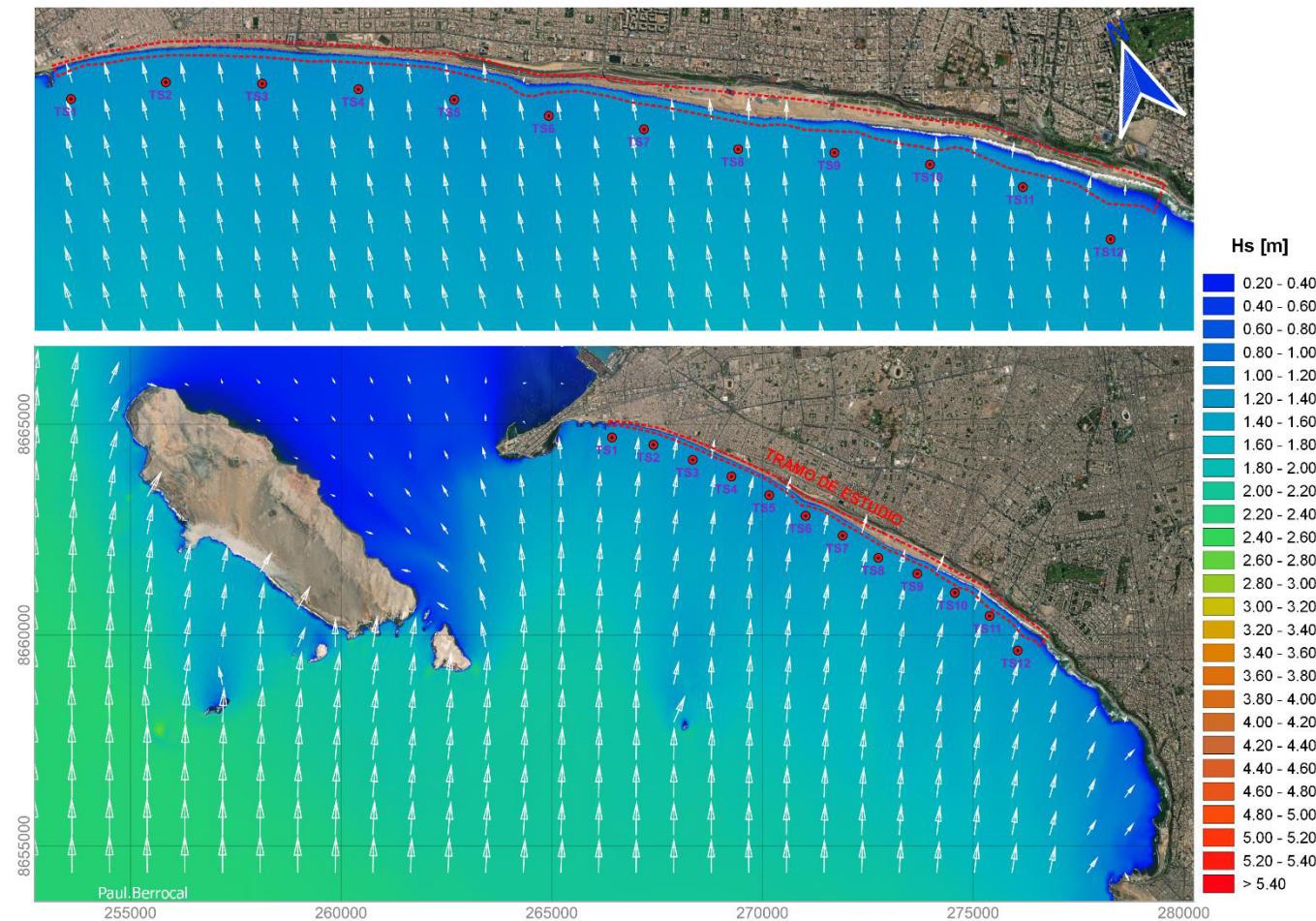


Figura 28

Propagación de oleaje con dirección Sur - Suroeste (202.5°), condición promedio ($H_s=2.14m$, $T_p=14.29s$).

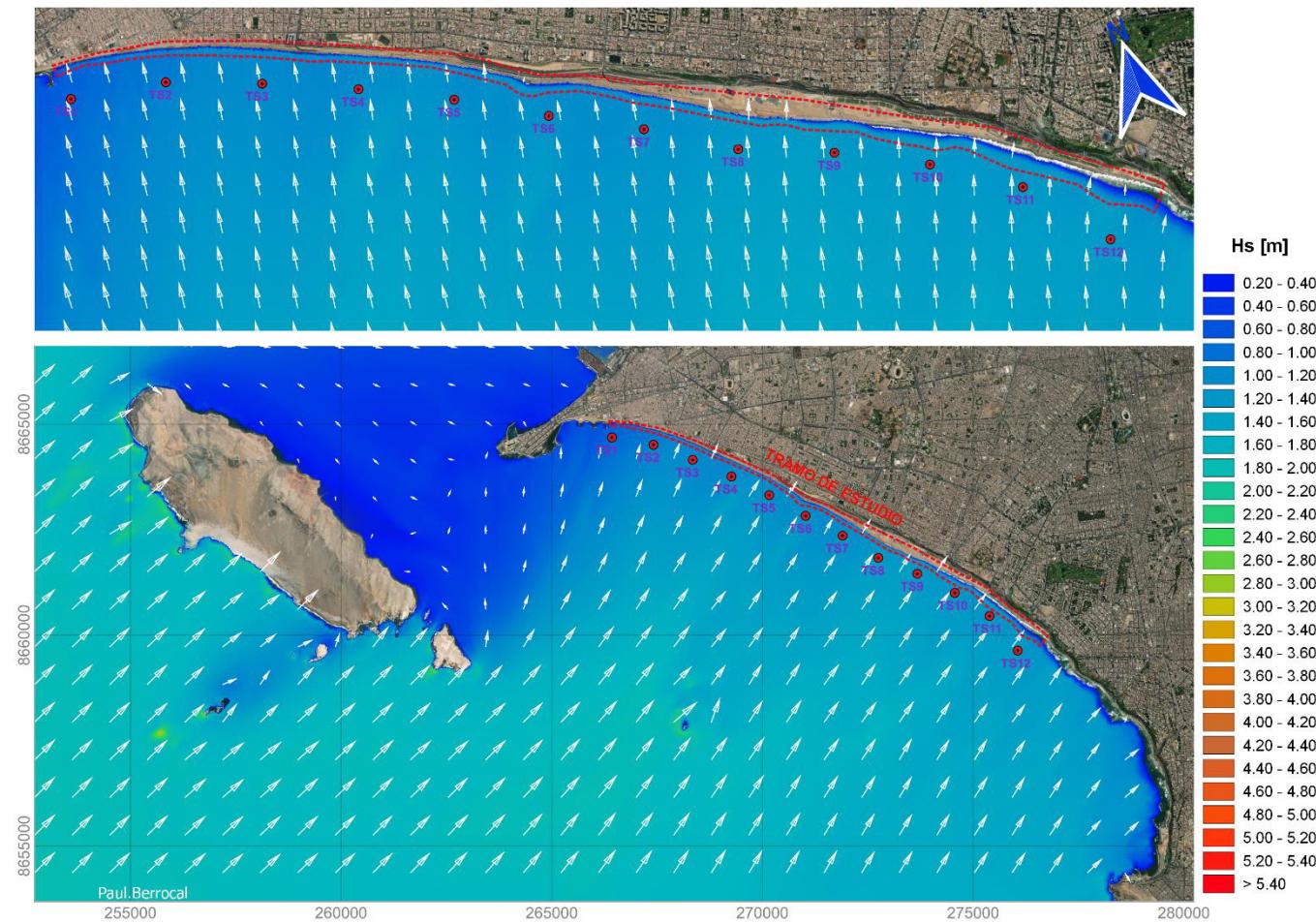


Figura 29

Propagación de oleaje con dirección Suroeste (225°), condición promedio ($H_s=1.96m$, $T_p=14.49s$).

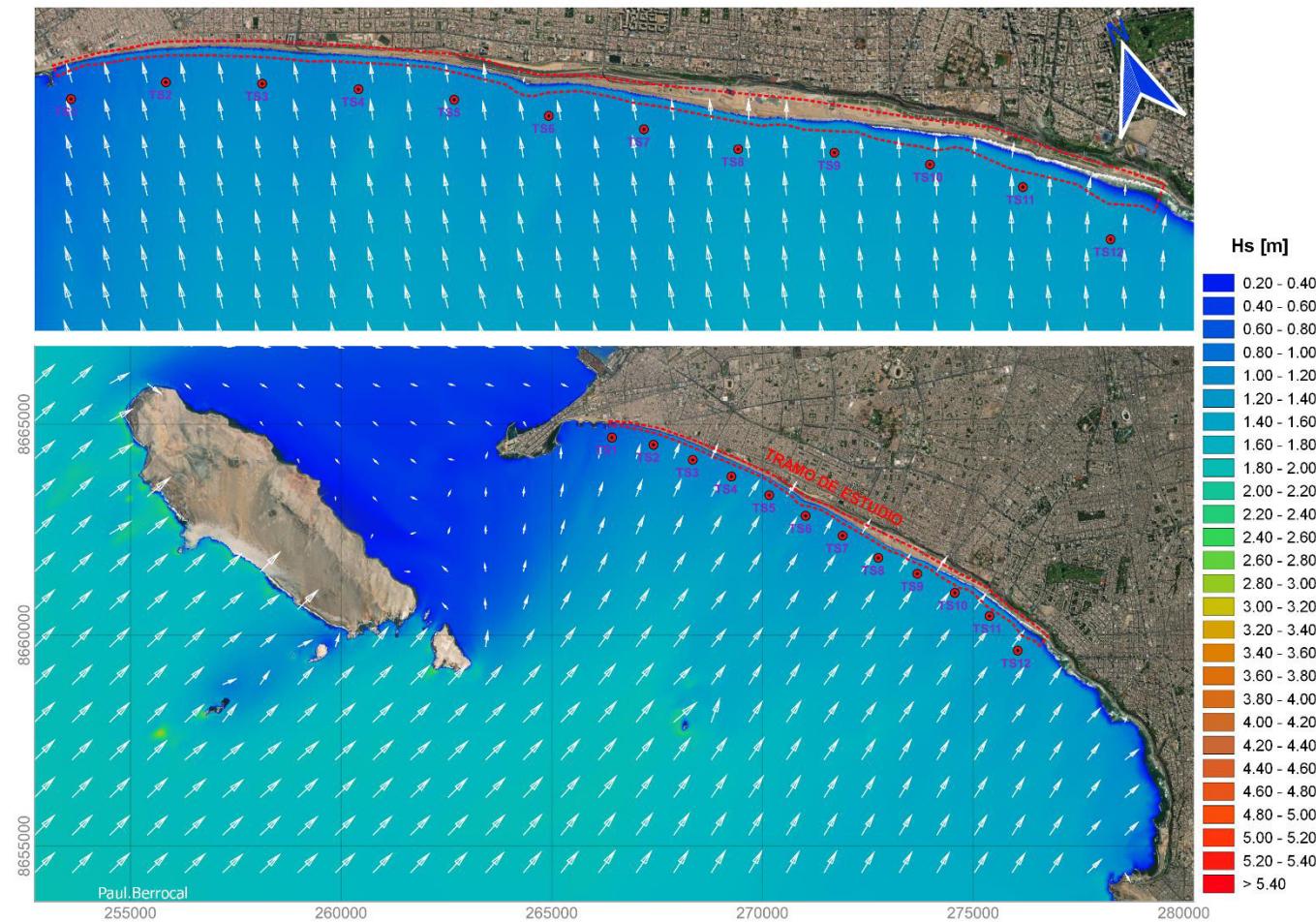


Figura 30

Propagación de oleaje con dirección Oeste Suroeste (247.5°), condición promedio ($H_s=1.76m$, $T_p=14.71s$).

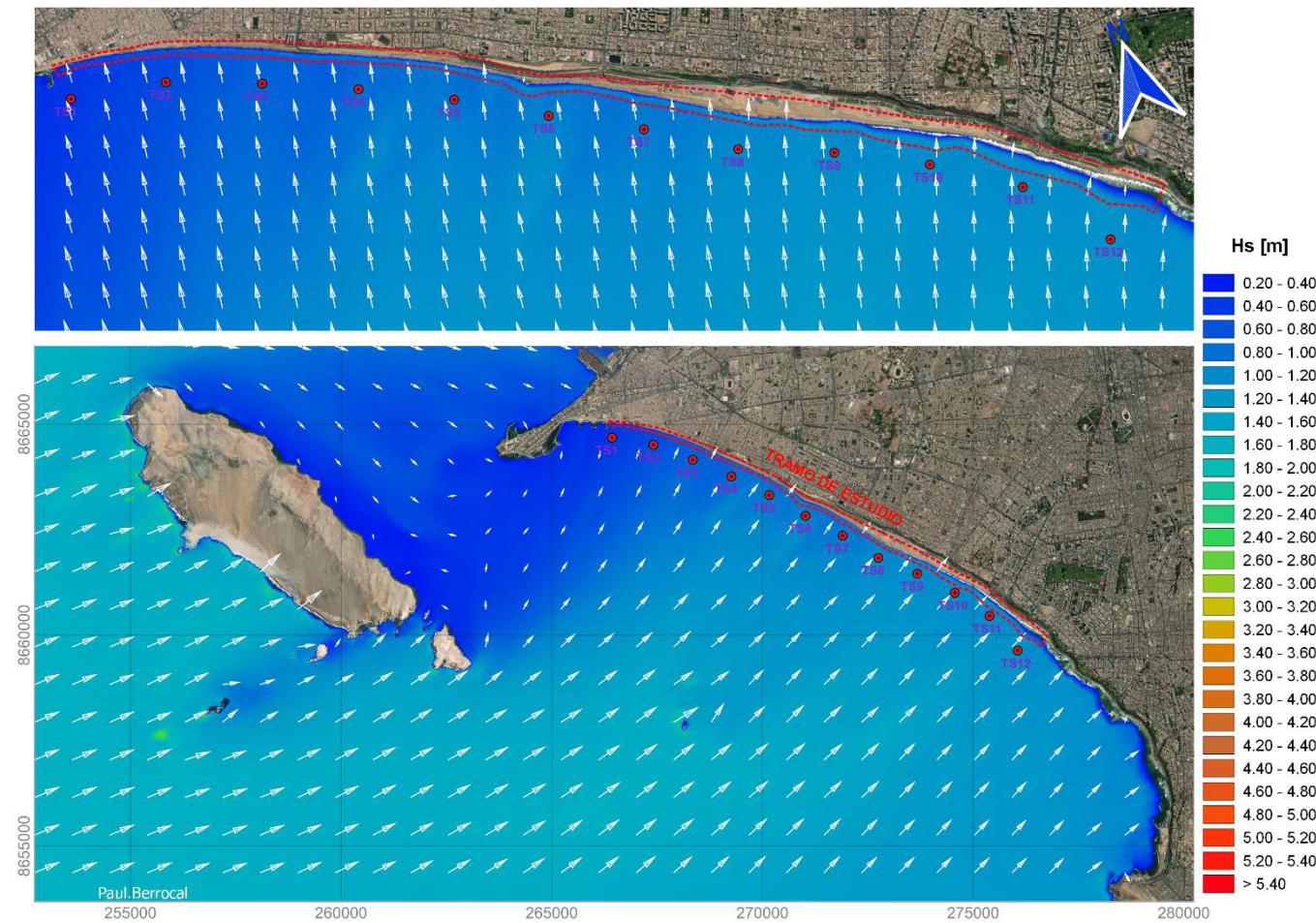


Figura 31

Propagación de oleaje con dirección Oeste (270°), condición promedio ($H_s=1.75m$, $T_p=15.63s$).

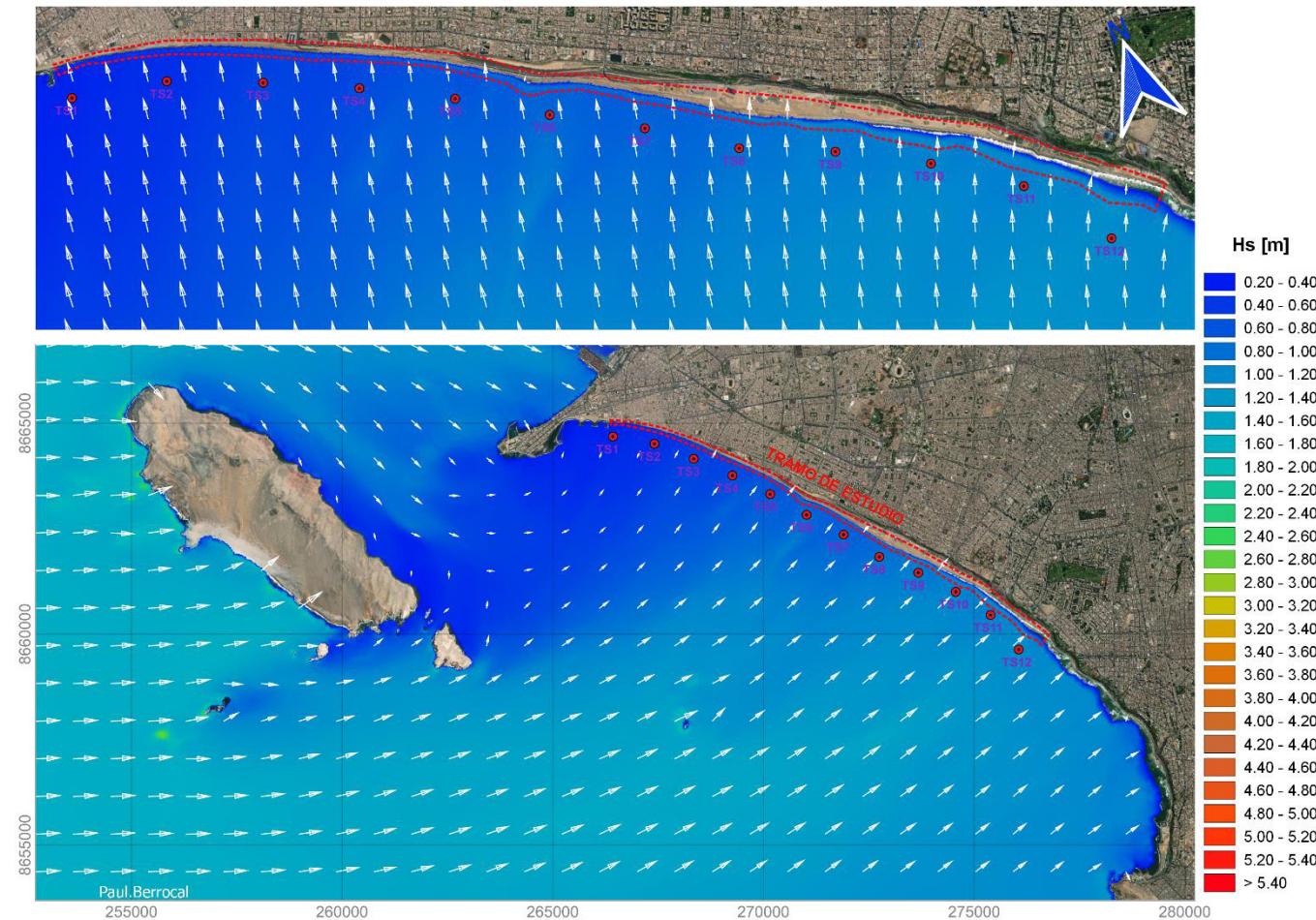


Figura 32

Propagación de oleaje con dirección Oeste Noroeste (292.5°), condición promedio ($H_s=1.71m$, $T_p=16.34s$).

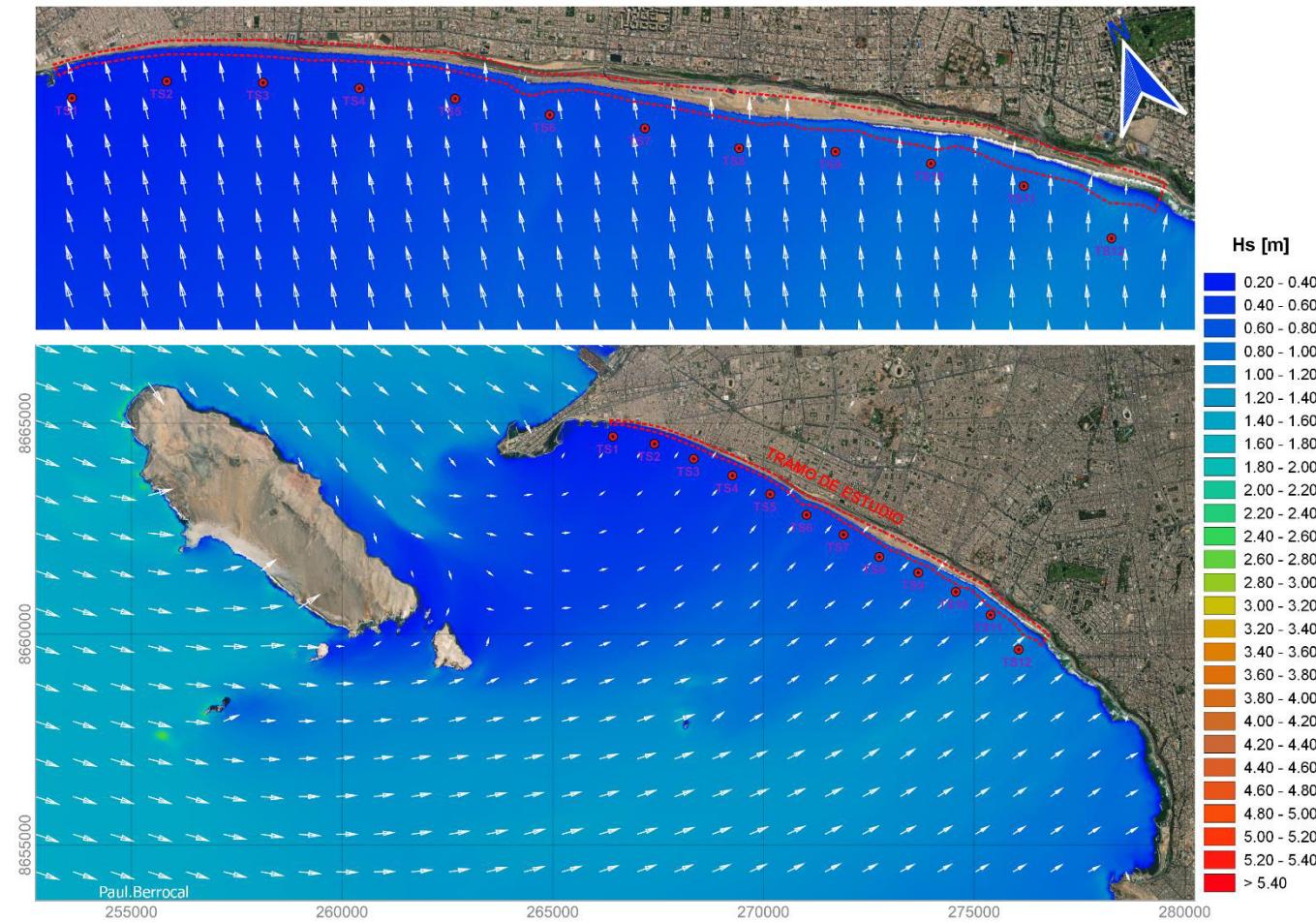


Figura 33

Propagación de oleaje con dirección Sur (180°), condición máximo anual ($H_s=4.50m$, $T_p=10.30s$).

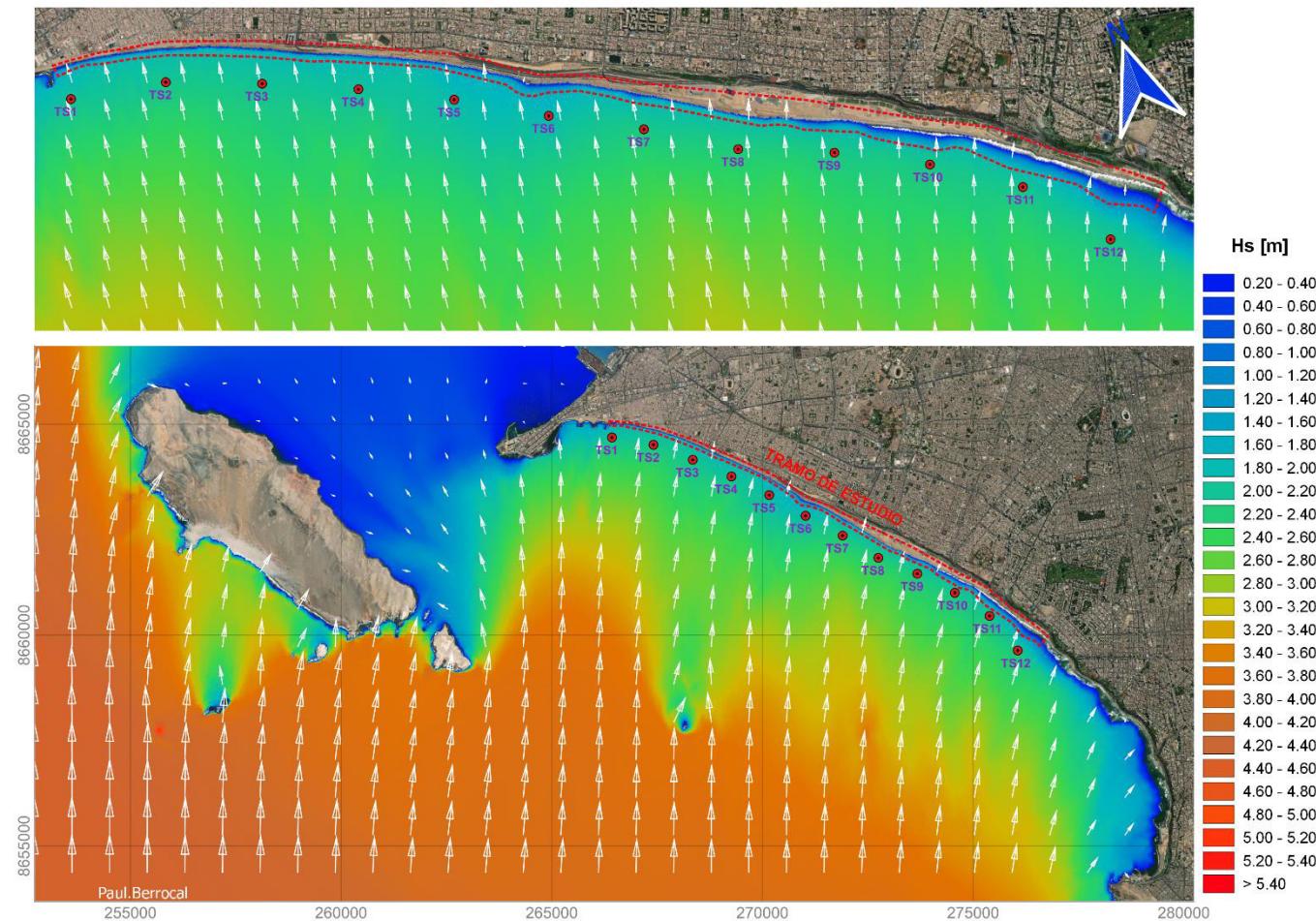


Figura 34

Propagación de oleaje con dirección Sur - Suroeste (202.5°), condición máximo anual ($H_s=4.14m$, $T_p=16.62s$).

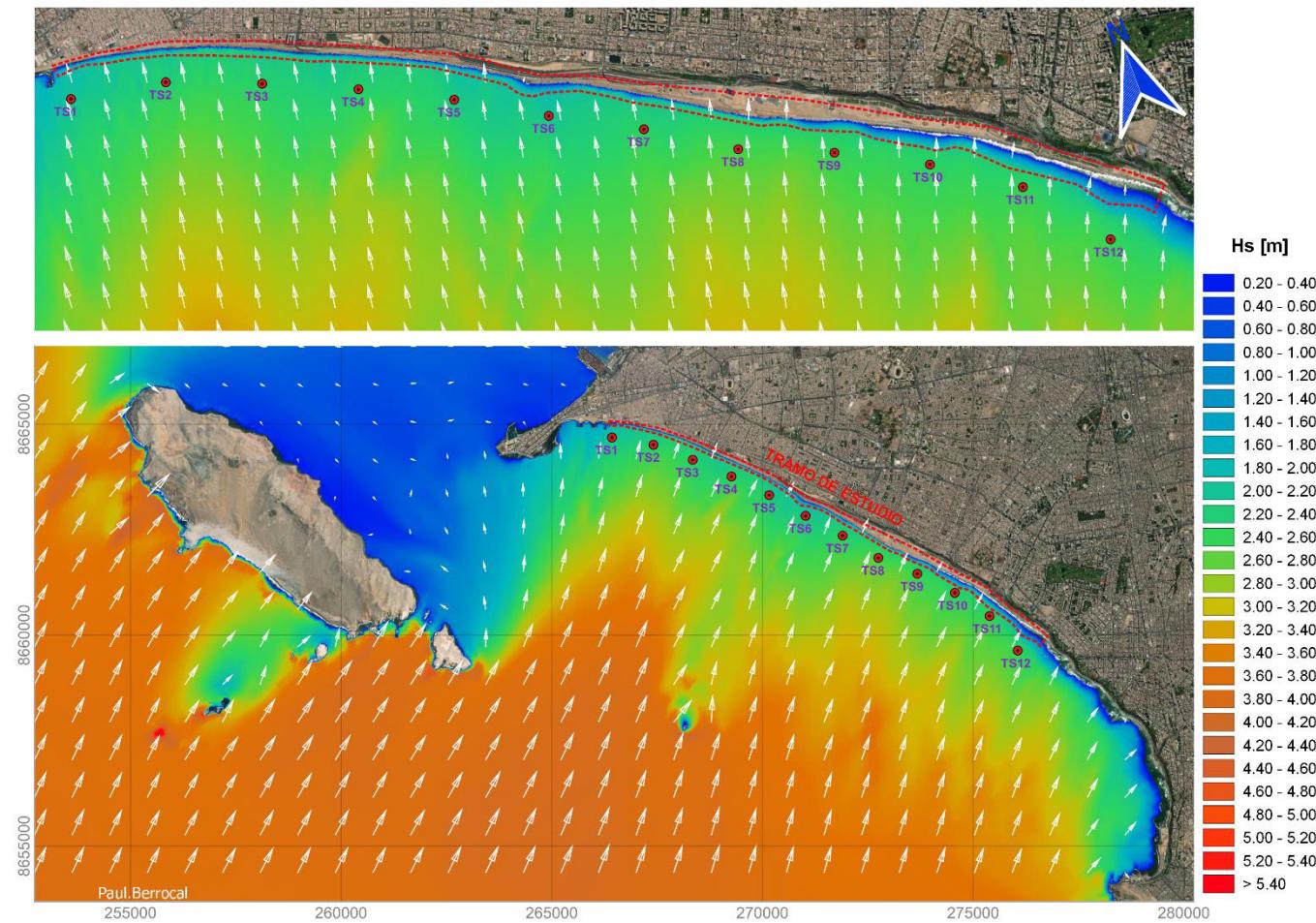


Figura 35

Propagación de oleaje con dirección Suroeste (225°), condición promedio ($H_s=3.71m$, $T_p=17.54s$).

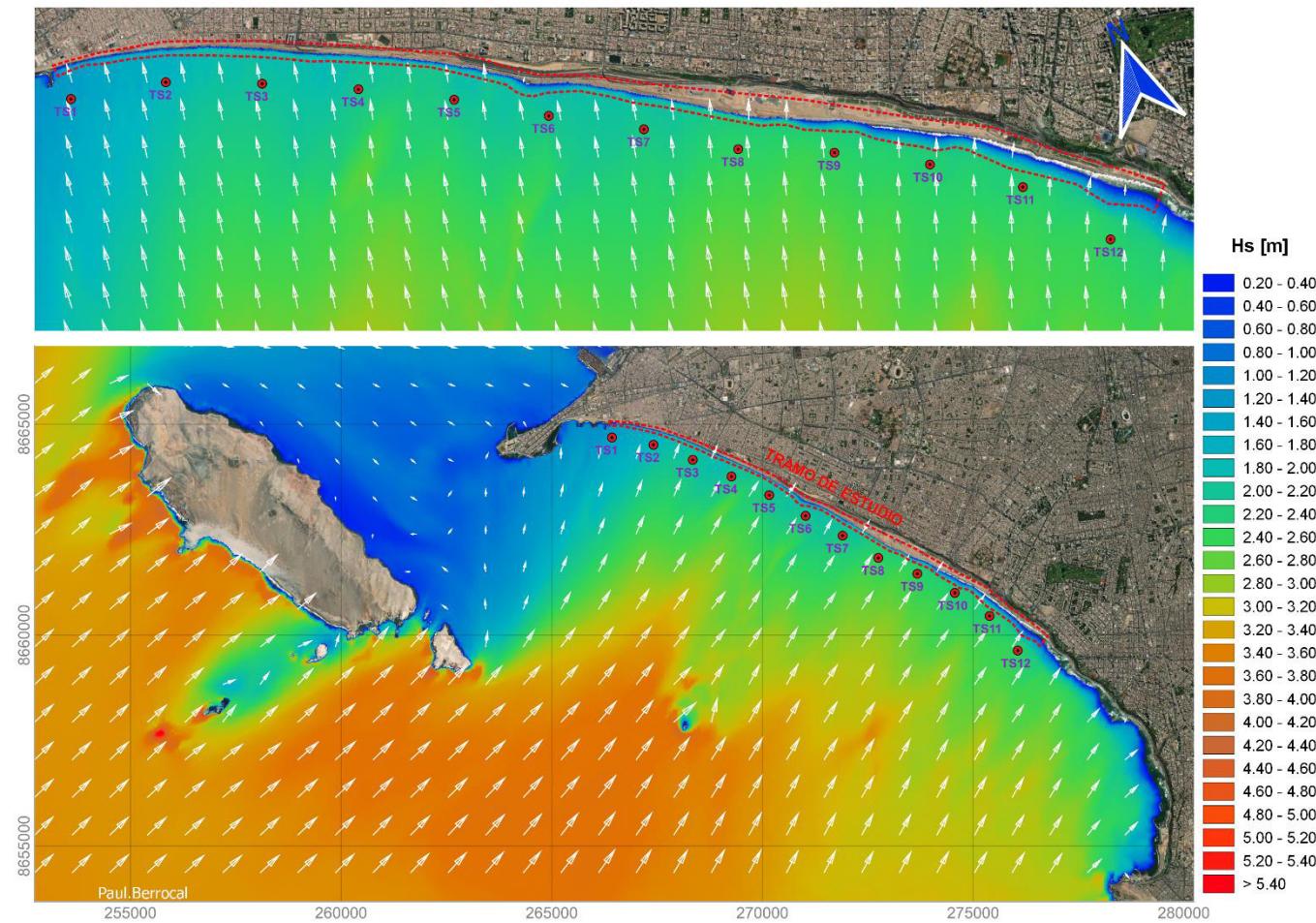


Figura 36

Propagación de oleaje con dirección Oeste Suroeste (247.5°), condición promedio ($H_s=3.24m$, $T_p=18.71s$).

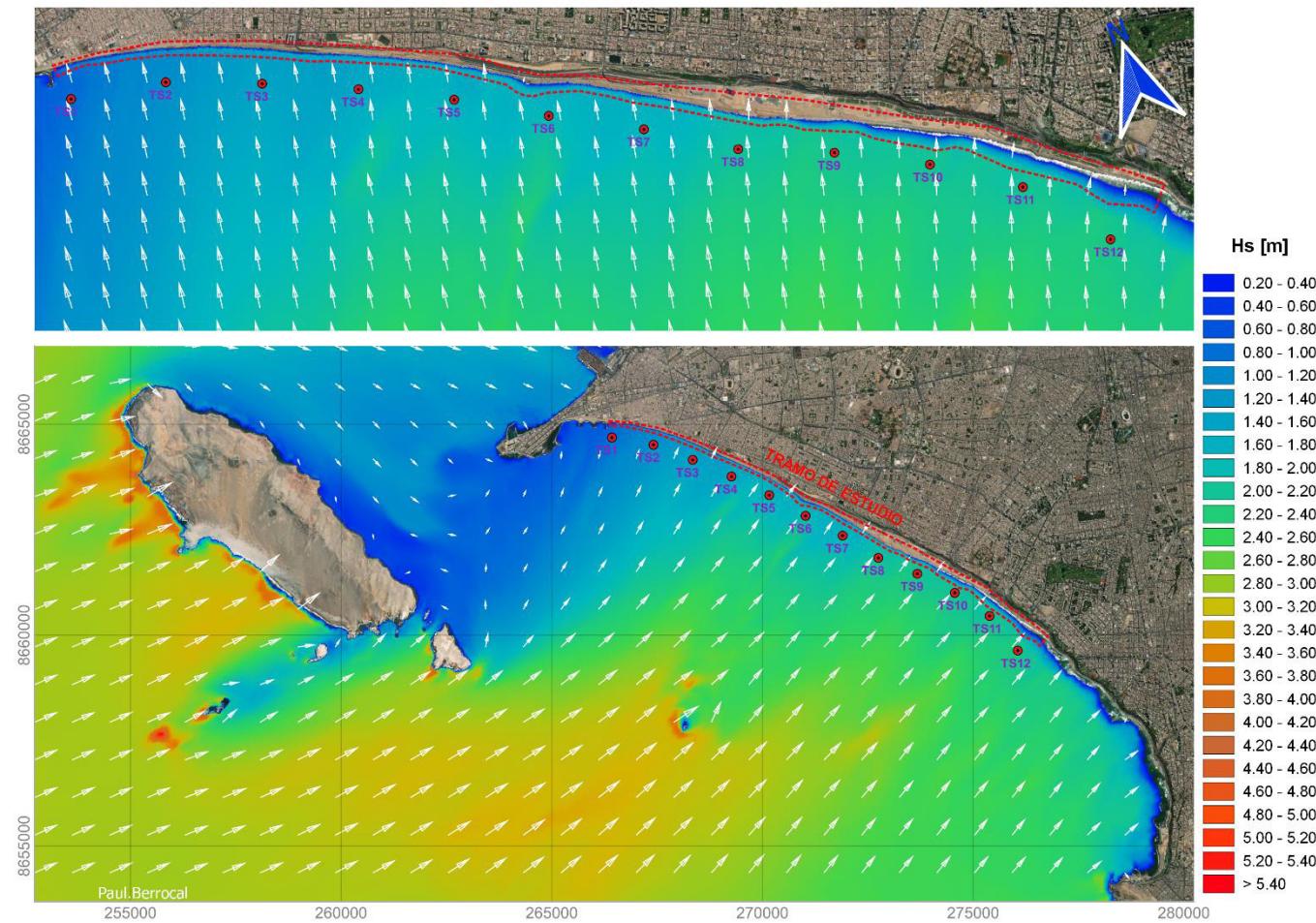


Figura 37

Propagación de oleaje con dirección Oeste (270°), condición promedio ($H_s=2.91m$, $T_p=19.28s$).

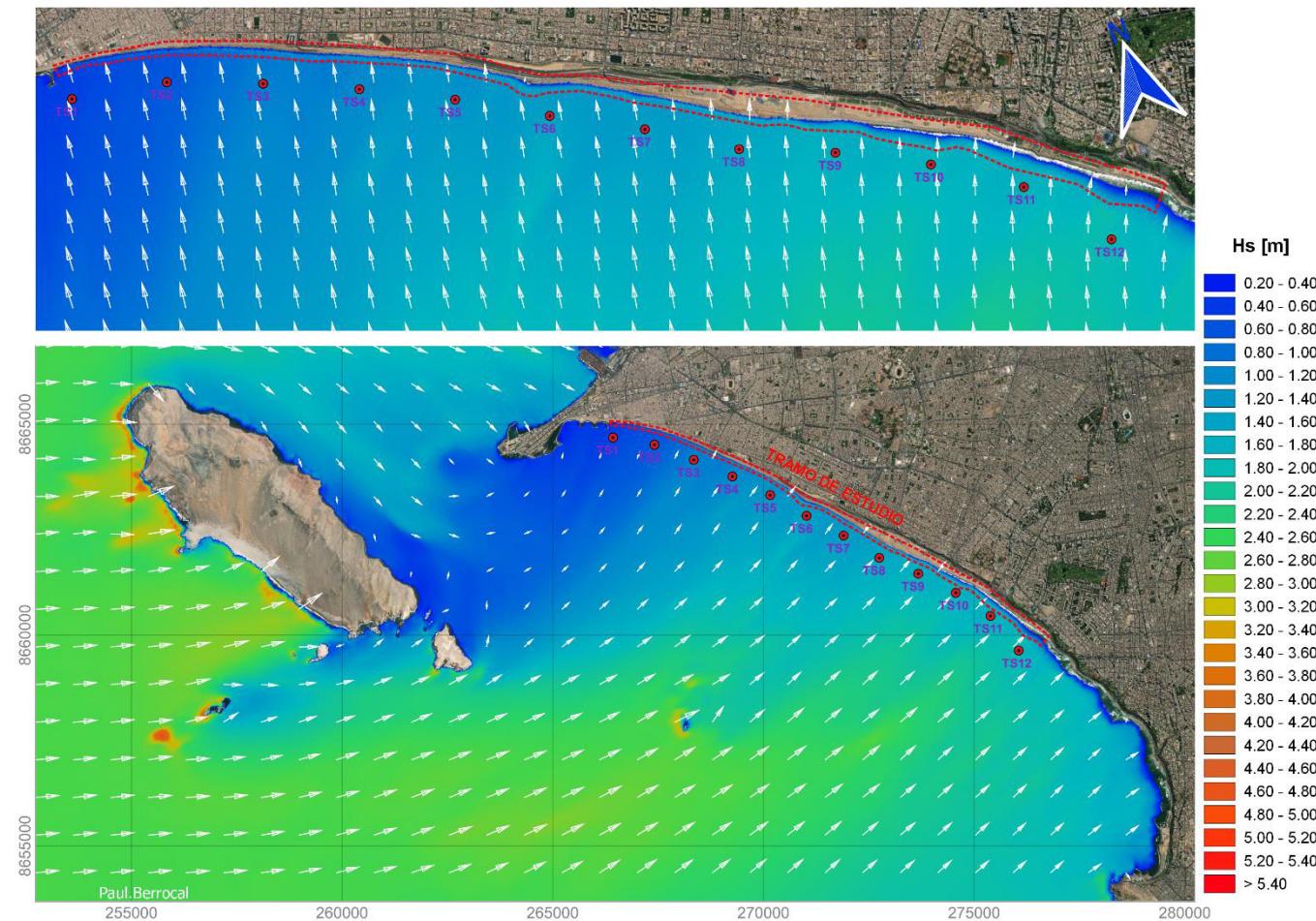


Figura 38

Propagación de oleaje con dirección Oeste Noroeste (292.5°), condición promedio ($H_s=2.82m$, $T_p=19.23s$).

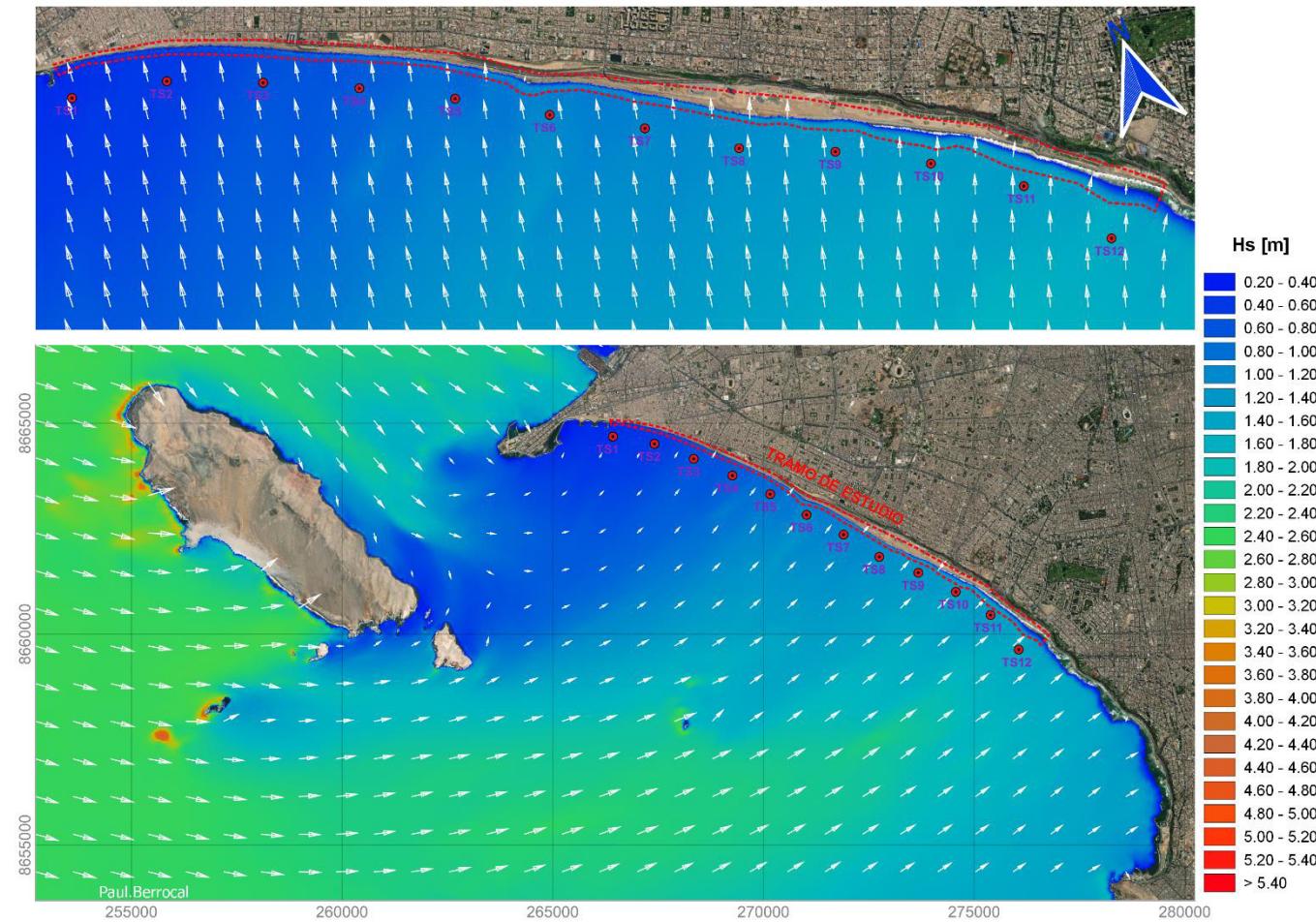


Figura 39

Propagación de oleaje con dirección Sur (180°), condición extremal ($H_s=5.00m$, $T_p=11.11s$).

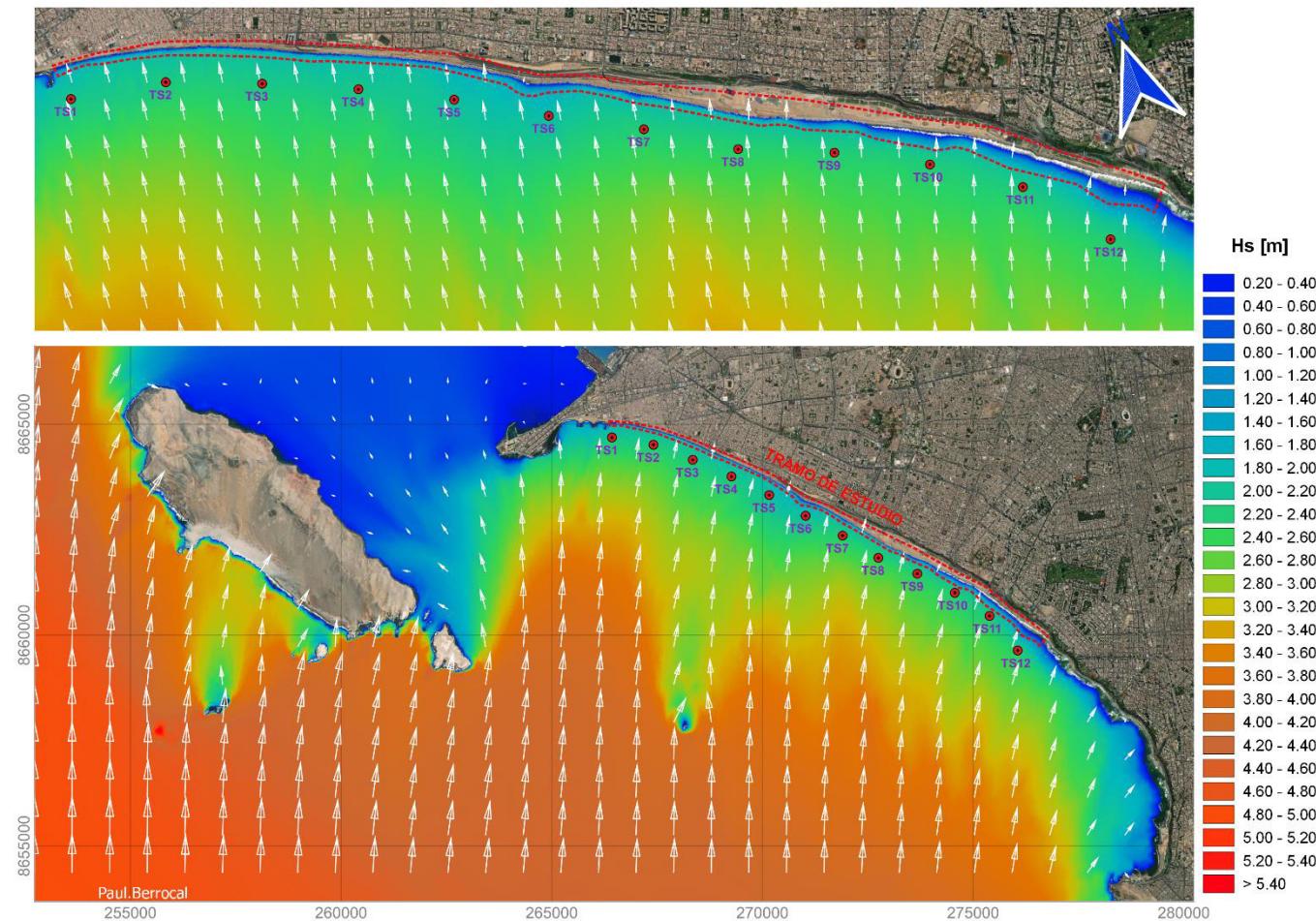


Figura 40

Propagación de oleaje con dirección Sur - Suroeste (202.5°), condición extremal ($H_s=5.10m$, $T_p=17.24s$).

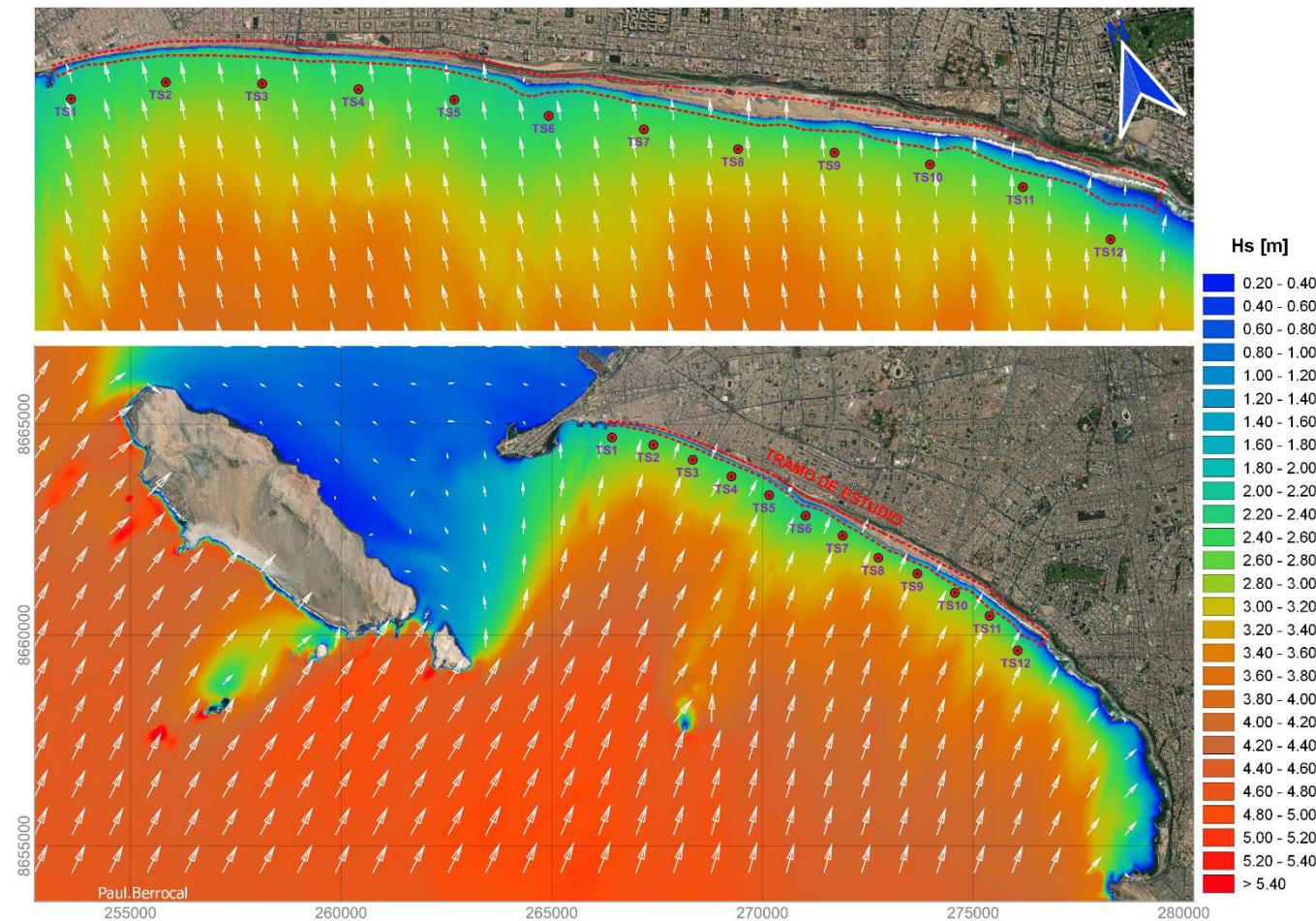


Figura 41

Propagación de oleaje con dirección Suroeste (225°), condición extremal ($H_s=5.20m$, $T_p=18.64s$).

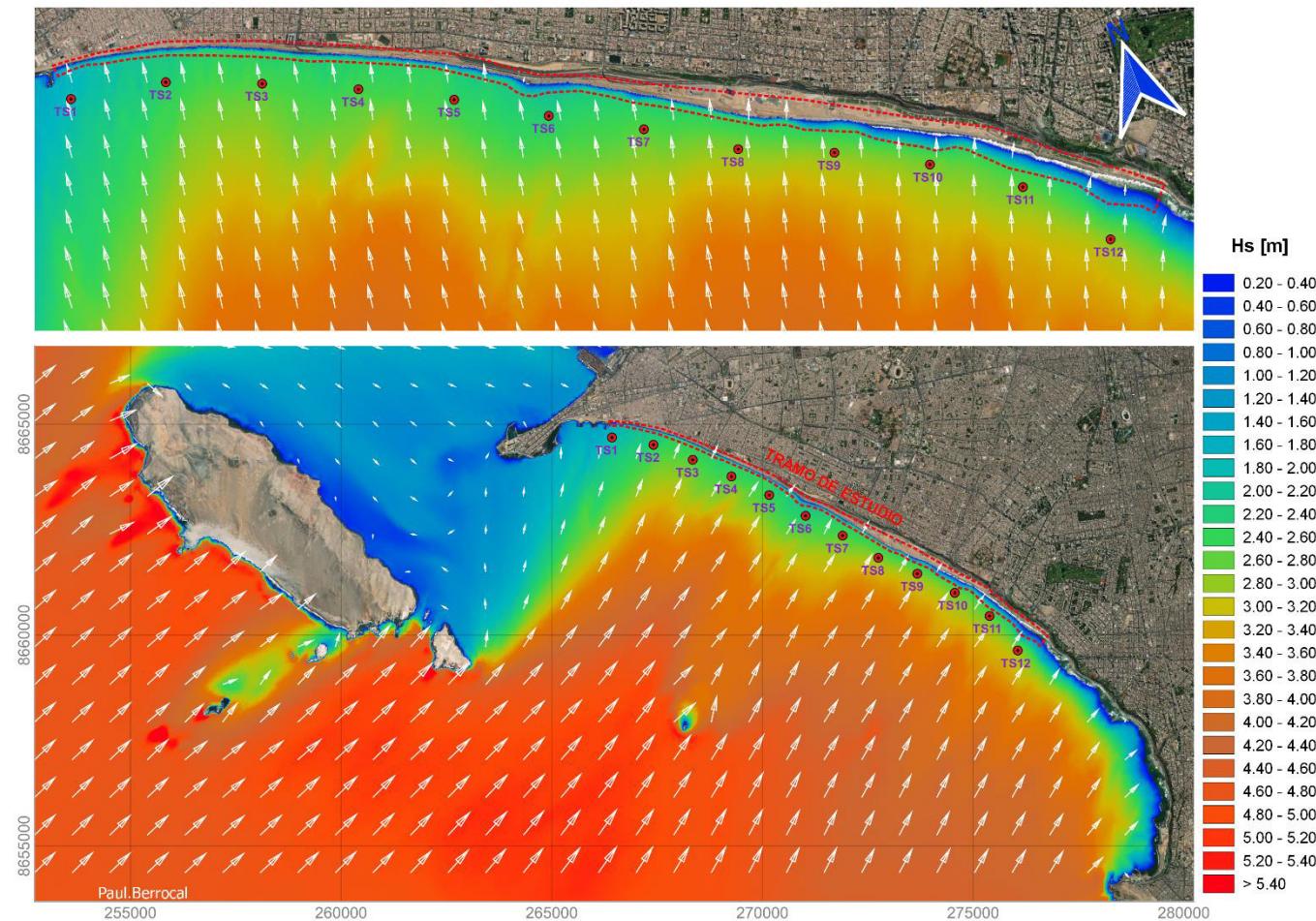


Figura 42

Propagación de oleaje con dirección Oeste Suroeste (247.5°), condición extremal ($H_s=3.68m$, $T_p=17.54s$).

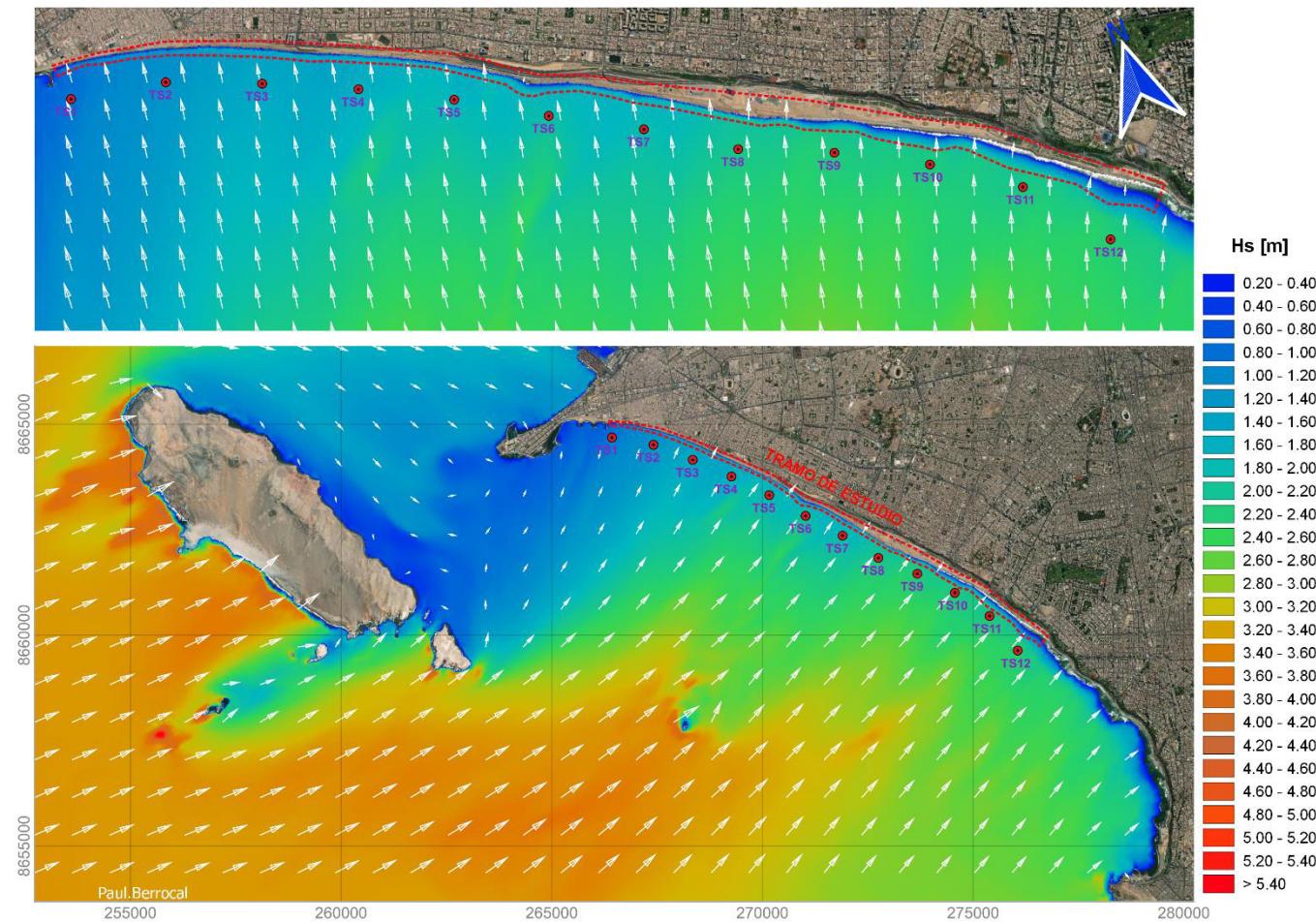


Figura 43

Propagación de oleaje con dirección Oeste (270°), condición extremal ($H_s=3.29m$, $T_p=18.53s$).

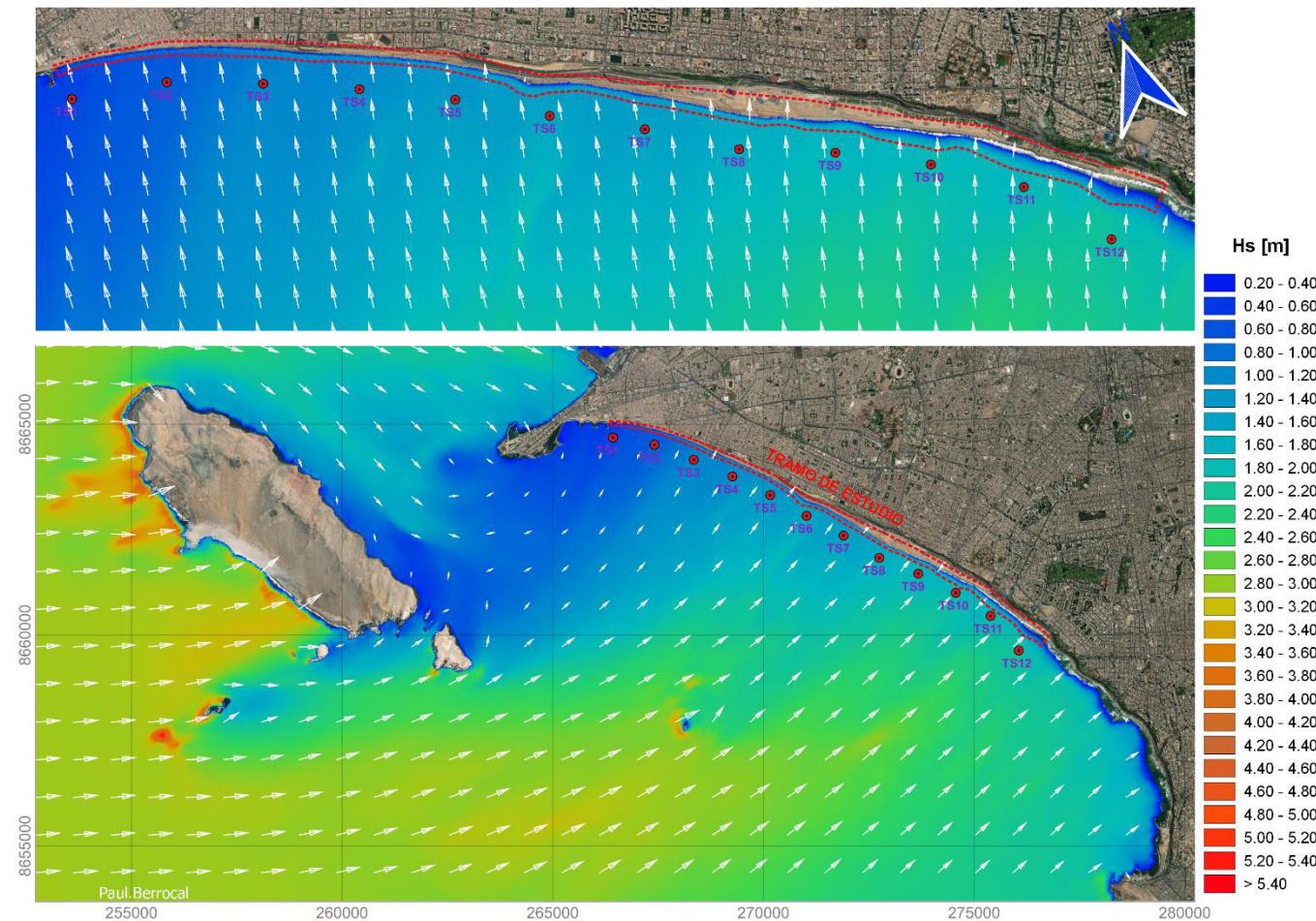
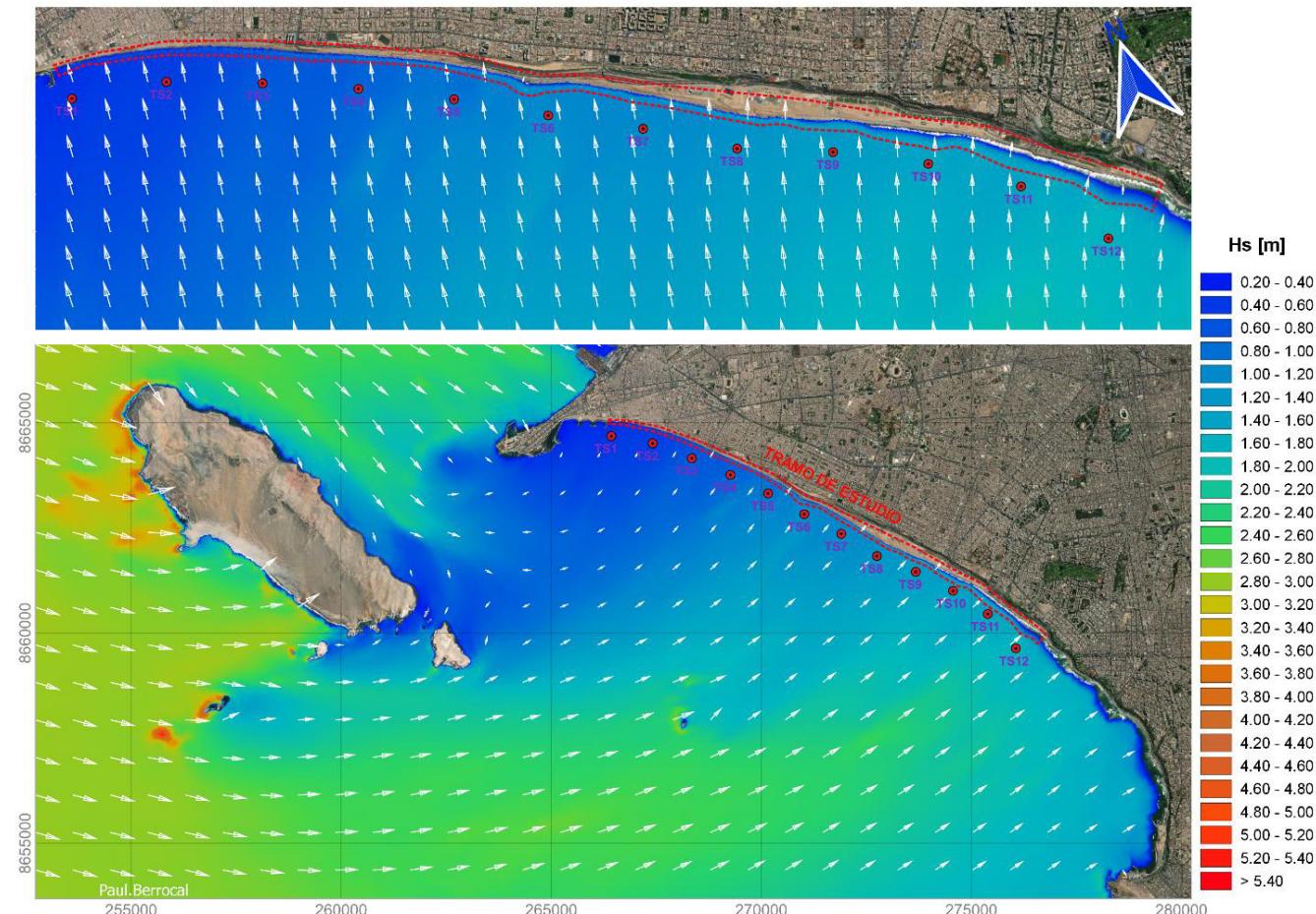


Figura 44

Propagación de oleaje con dirección Oeste Noroeste (292.5°), condición extremal ($H_s=3.29m$, $T_p=18.48s$).

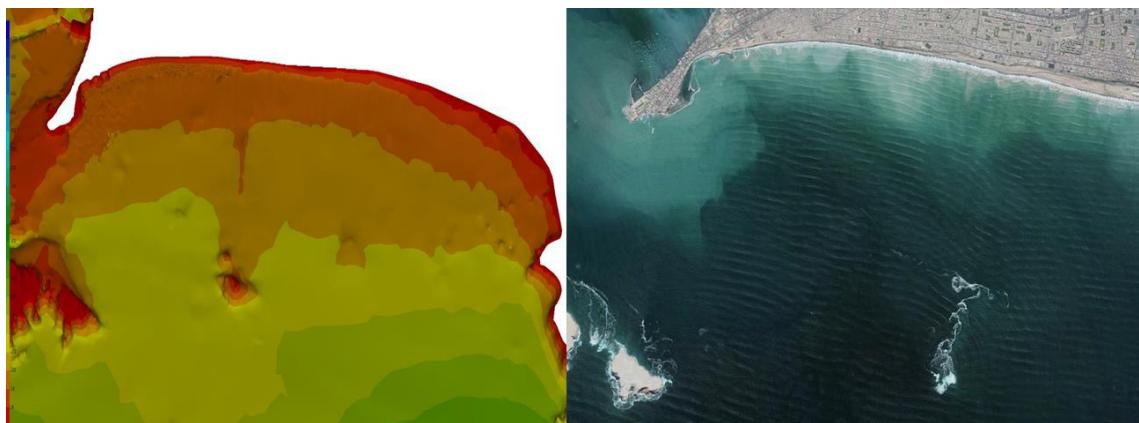


De las salidas gráficas de los casos modelados se puede observar que la propagación de los oleajes del tercer cuadrante (S, SSO y SO) penetran con mayor energía en la bahía de Miraflores, mientras que los oleajes provenientes con dirección OSO, O y ONO se encuentran condicionados por la isla San Lorenzo y la isla del Frontón generando un abrigo en la punta Callao y penetrando principalmente en la zona de San Miguel a Barranco.

En el tramo de Chorrillos a Barranco el oleaje proveniente del tercer cuadrante penetra con menor intensidad debido al abrigo parcial del Morro Solar lo cual ocasiona que el oleaje se difracte y pierda parte de su energía, en el tramo de Miraflores a La Mar Brava, el oleaje penetra de manera directa y en el tramo Mar Brava a La Punta genera un abrigo parcial la isla del frontón. En el tramo central, la presencia de las islas horadadas transforma los frentes de oleaje, además del fenómeno de difracción se observa que debido a la distinta orientación de las isobatas los frentes de oleaje se refractan con diferente ángulo, ocasionando un comportamiento diferente por su lado norte y sur.

Figura 45

Modelo de terreno con presencia de las islas horadas (Lado izquierdo) e imagen satelital del oleaje refractado y difractado (Lado derecho).



Nota. Elaboración propia con cartas batimétricas y ortofoto de Google earth.

3.6.1.6.4 Calibración y Validación del Modelo

Para validar que el modelo de propagación de olas reproduce de manera correcta el comportamiento de las olas en nuestro tramo de estudio, se reconstruyó el clima de olas en las ubicaciones donde fueron instalados los equipos ADCP para luego realizar una comparación entre los datos de altura de ola, periodo pico y dirección de oleaje obtenidos de la reconstrucción y lo medido en campo.

Realizando una serie de corridas, se observó que el parámetro físico más sensible en nuestro modelo es el coeficiente de rugosidad por lo que se realizó la reconstrucción del clima con 7 valores de coeficiente de rugosidad, siendo sus valores de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05.

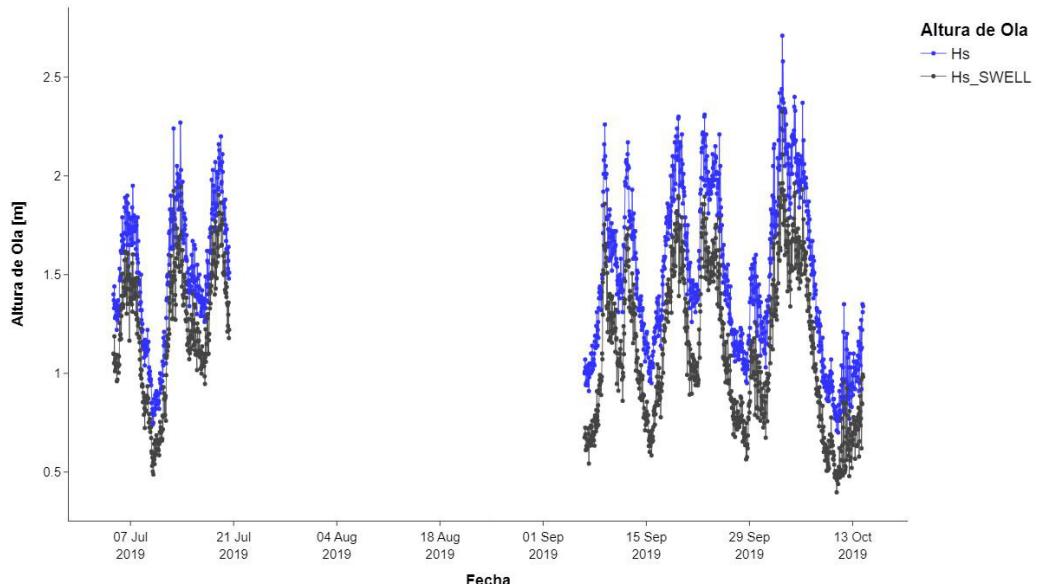
De acuerdo con los espectros de energía de oleaje mostrados en la figura 20 se puede visualizar la presencia de un oleaje reflejado y debido a que el software MIKE 21 SW no resuelve el fenómeno de reflexión, si realizamos una comparación entre la altura de ola obtenida del modelo con la altura de ola medida proveniente de la energía total de cada estado de mar, estaríamos sobre elevando la altura de ola en el modelo.

Debido a lo antes mencionado se procedió a filtrar la energía de los estados de mar medidos por los equipos ADCP's tomando en cuenta solamente la energía de los oleajes provenientes desde aguas profundas, reduciéndose así los valores de altura de ola. La altura de ola proveniente de la energía filtrada la denominaremos H_s SWELL y con este valor de altura de ola se procederá a realizar la calibración del modelo.

A continuación, se muestra una comparación entre la altura de ola correspondiente a la energía total y la altura de ola filtrada:

Figura 46

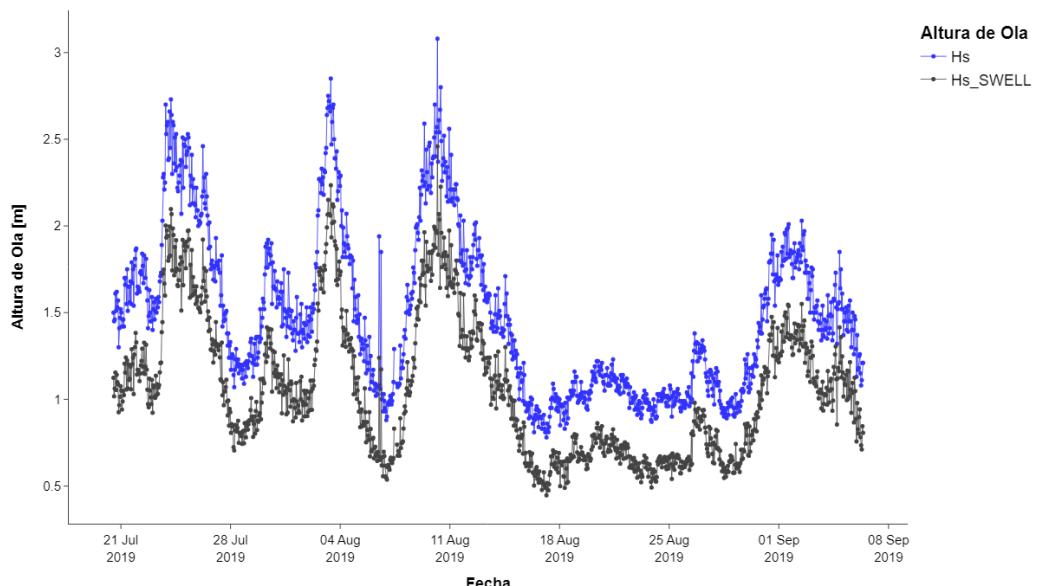
Comparación Hs obtenido de la energía total y Hs_SWELL obtenido de la energía filtrada – Primera ubicación.



Nota. Elaboración propia

Figura 47

Comparación Hs obtenido de la energía total y Hs_SWELL obtenido de la energía filtrada – Segunda ubicación.

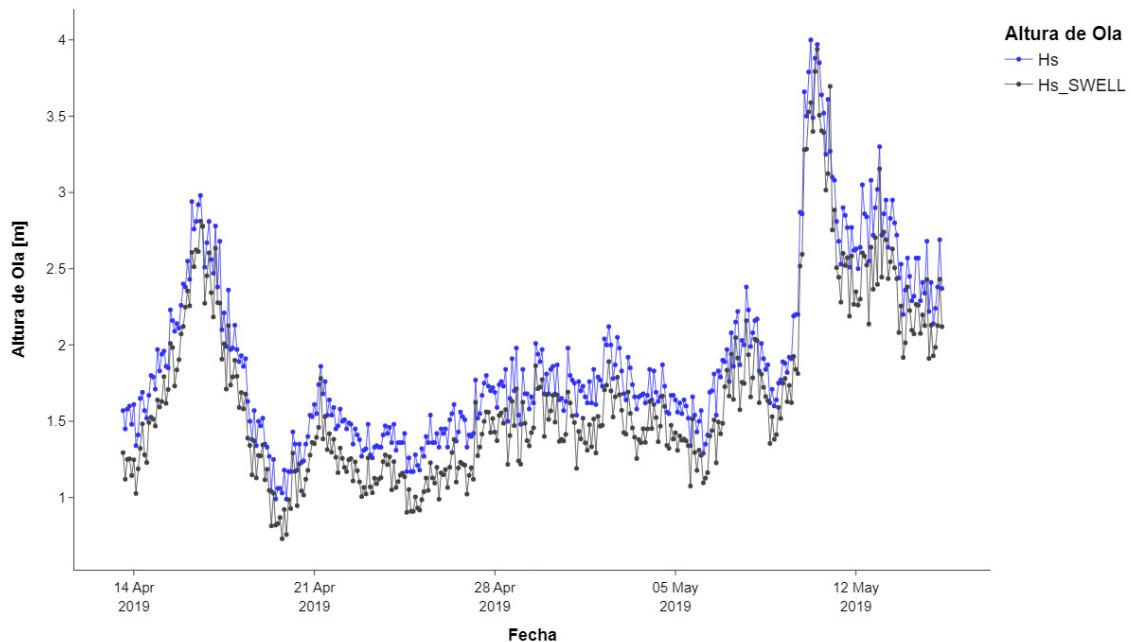


Nota. Elaboración propia

Figura 48

Comparación Hs obtenido de la energía total y Hs_SWELL obtenido de la energía filtrada –

Tercera ubicación.



Nota. Elaboración propia

Una vez obtenida la altura de ola de la energía filtrada, de ahora en adelante se procederá a comparar con la altura de ola reconstruida.

La reconstrucción del clima de olas en los puntos de ubicación del ADCP se realizó utilizando la dirección media de los datos del nodo en aguas profundas el cual brinda una mejor correlación con los datos de olas medidos en campo.

A continuación, se muestra la comparación entre la altura de ola medida y modelada con diferentes valores de rugosidad:

Figura 49

Comparaciónn entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Primera ubicación

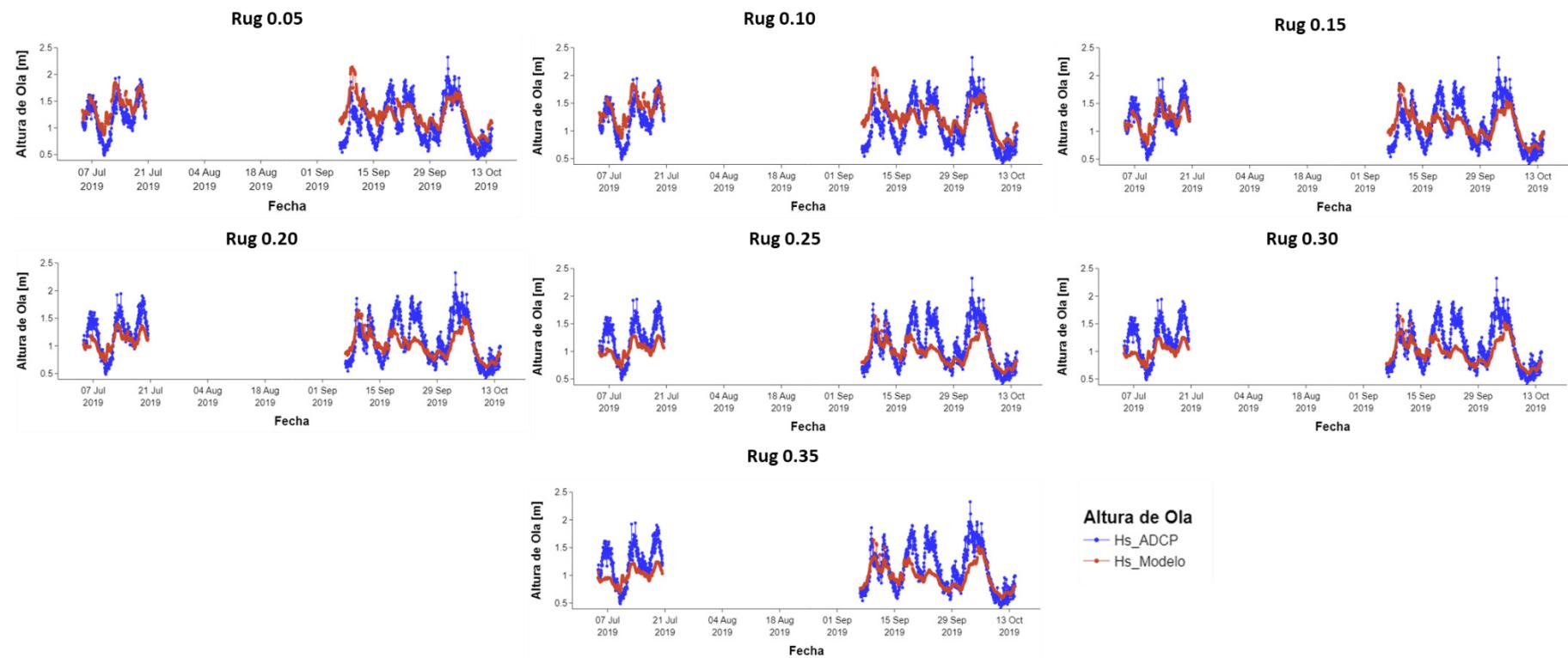


Figura 50

Comparaciónn entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Segunda ubicación

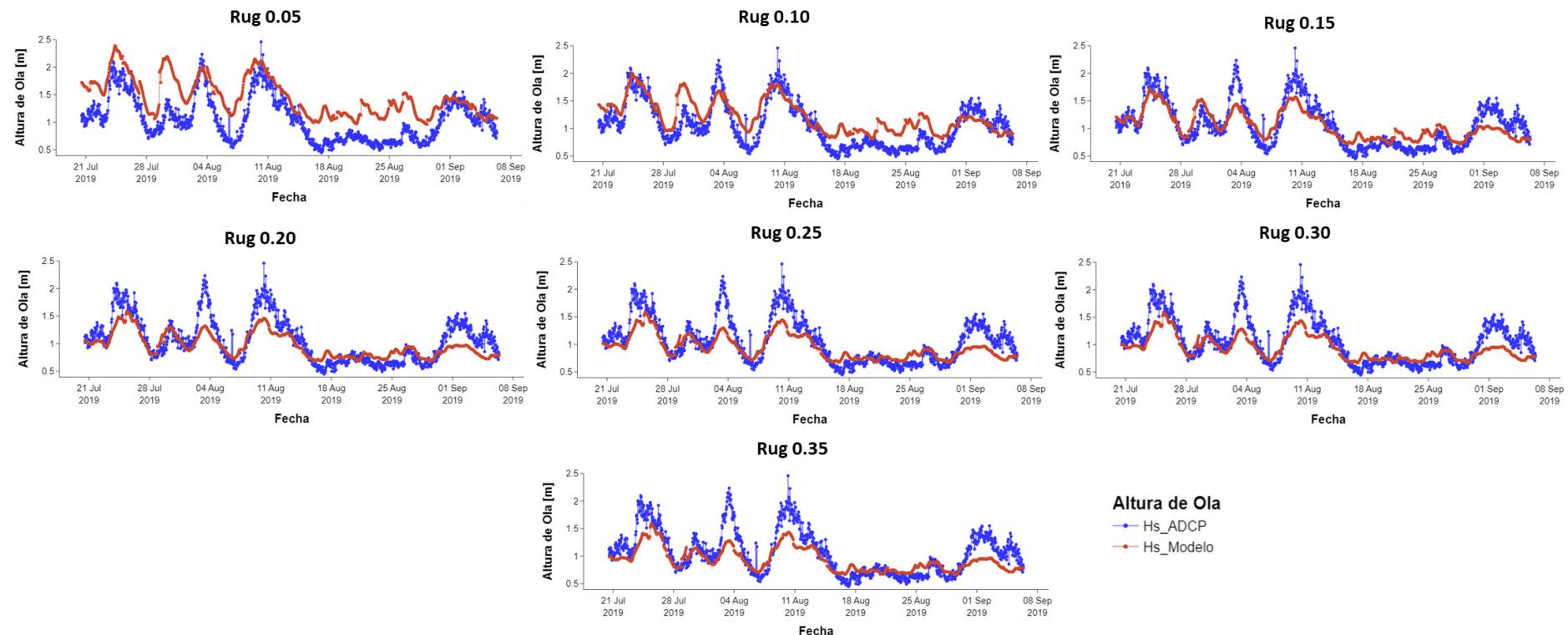
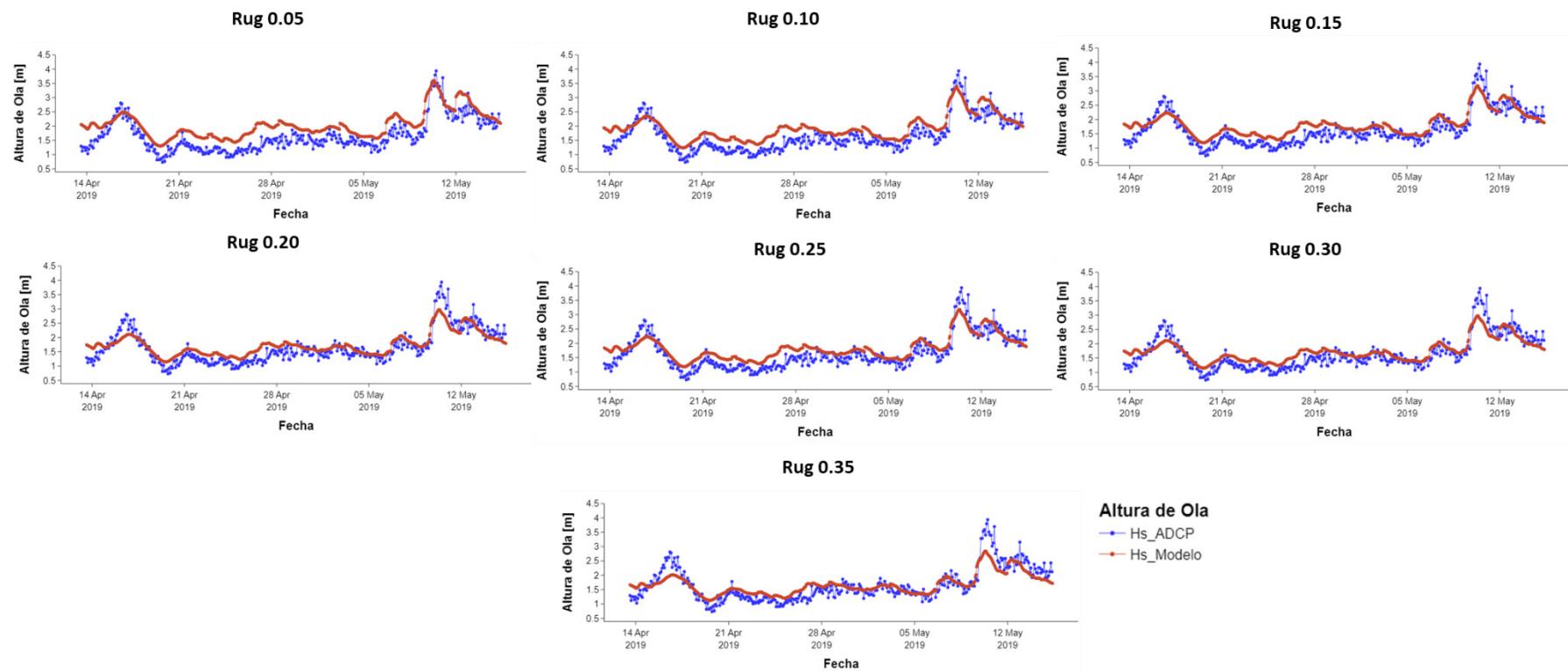


Figura 51

Comparaciónn entre Hs_ADCP (Hs_SWELL) y Hs_Mike21 (Hs_Modelo) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Tercera ubicación



Para poder determinar el valor de la rugosidad que genera un mejor ajuste entre la altura de ola reconstruida y la altura de ola medida en campo, se procedió a calcular los siguientes parámetros estadísticos:

Ecuación 11: RMSE (Error cuadrático medio)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (Hs_mod - Hs_med)^2}{N}}$$

Ecuación 12: BIAS (Sesgo entre el dato modelado y medido)

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_i^N (Hs_mod_i - Hs_med_i)$$

Ecuación 13: SI (Indice de dispersión)

$$SI = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_i^N Hs_mod_i}$$

Ecuación 14: PE (Porcentaje de error)

$$PE = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^N ((Hs_mod_i - Hs_med_i)/Hs_med_i)^2}{N}}$$

Donde:

Hs_mod= altura de ola modelada

Hs_med= altura de ola medida

N= número de datos

En las figuras 49, 50 y 51 se muestran las gráficas de correlación entre la altura de ola medida y la altura de ola reconstruida en cada ubicación para las rugosidades de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05.

Figura 52

Correlación entre Hs_{ADCP} (Hs_{SWELL}) y Hs_{Mike21} (Hs_{Modelo}) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Primera ubicación

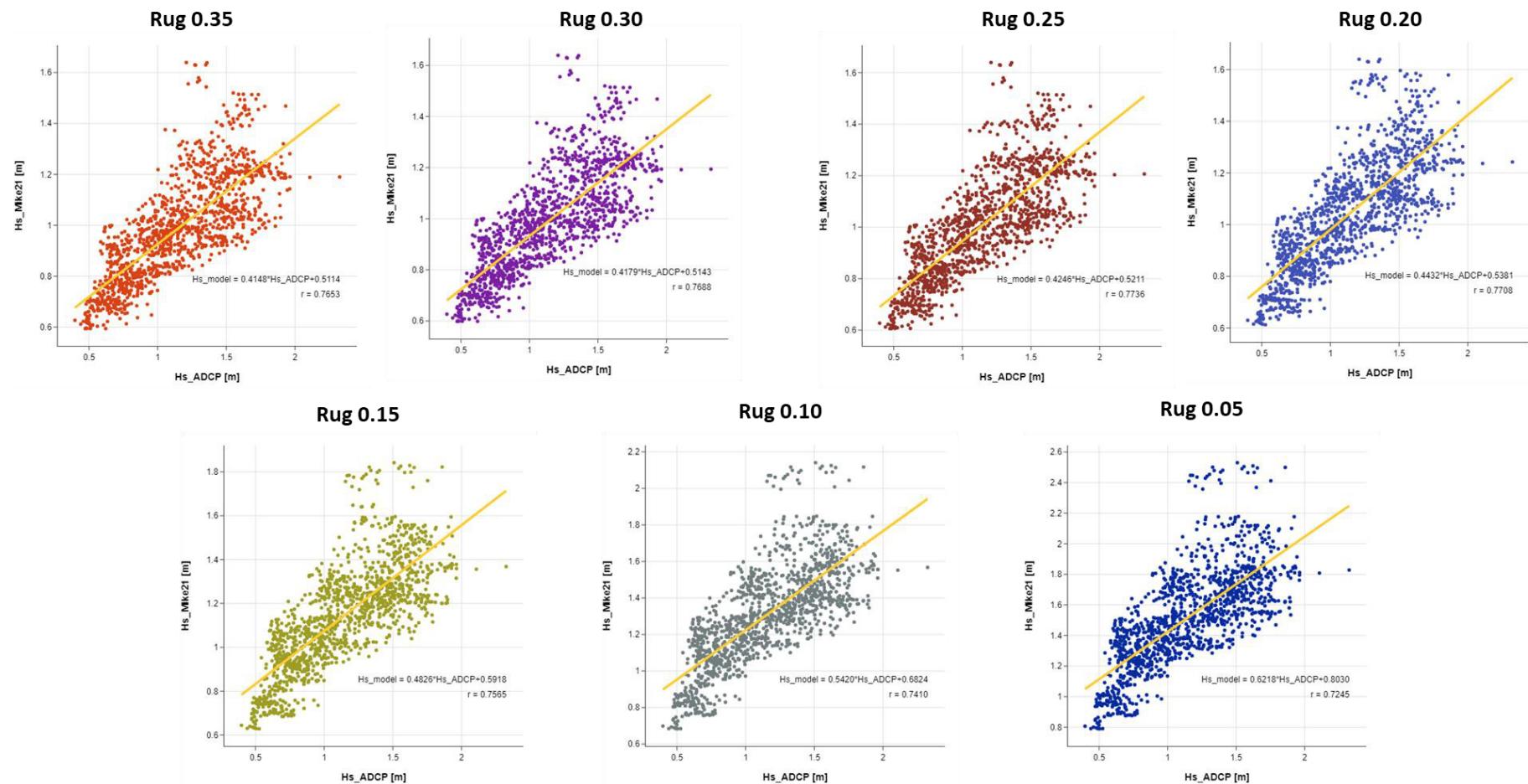


Figura 53

Correlación entre Hs_{ADCP} (Hs_{SWELL}) y Hs_{Mike21} (Hs_{Modelo}) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Segunda ubicación

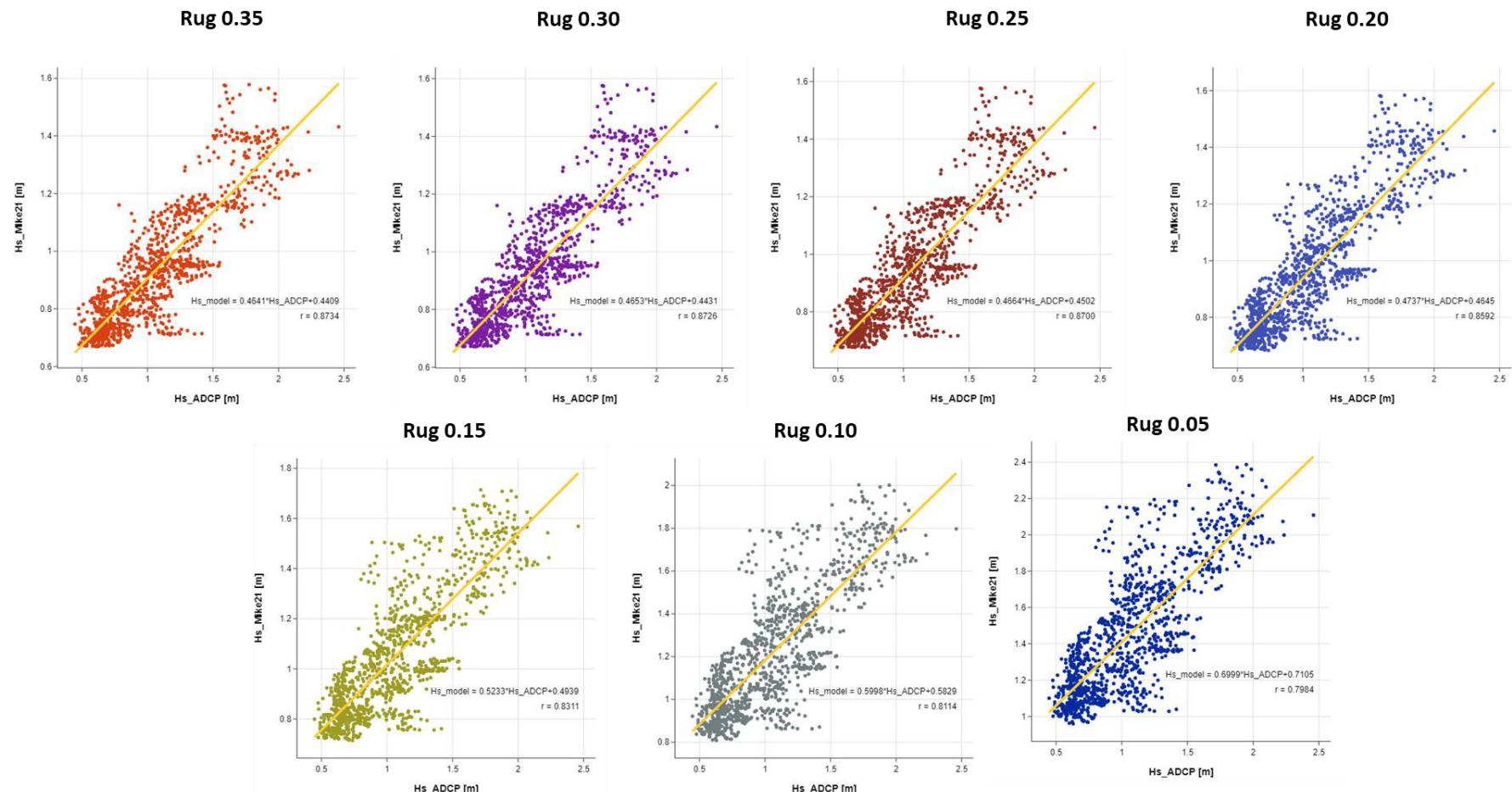
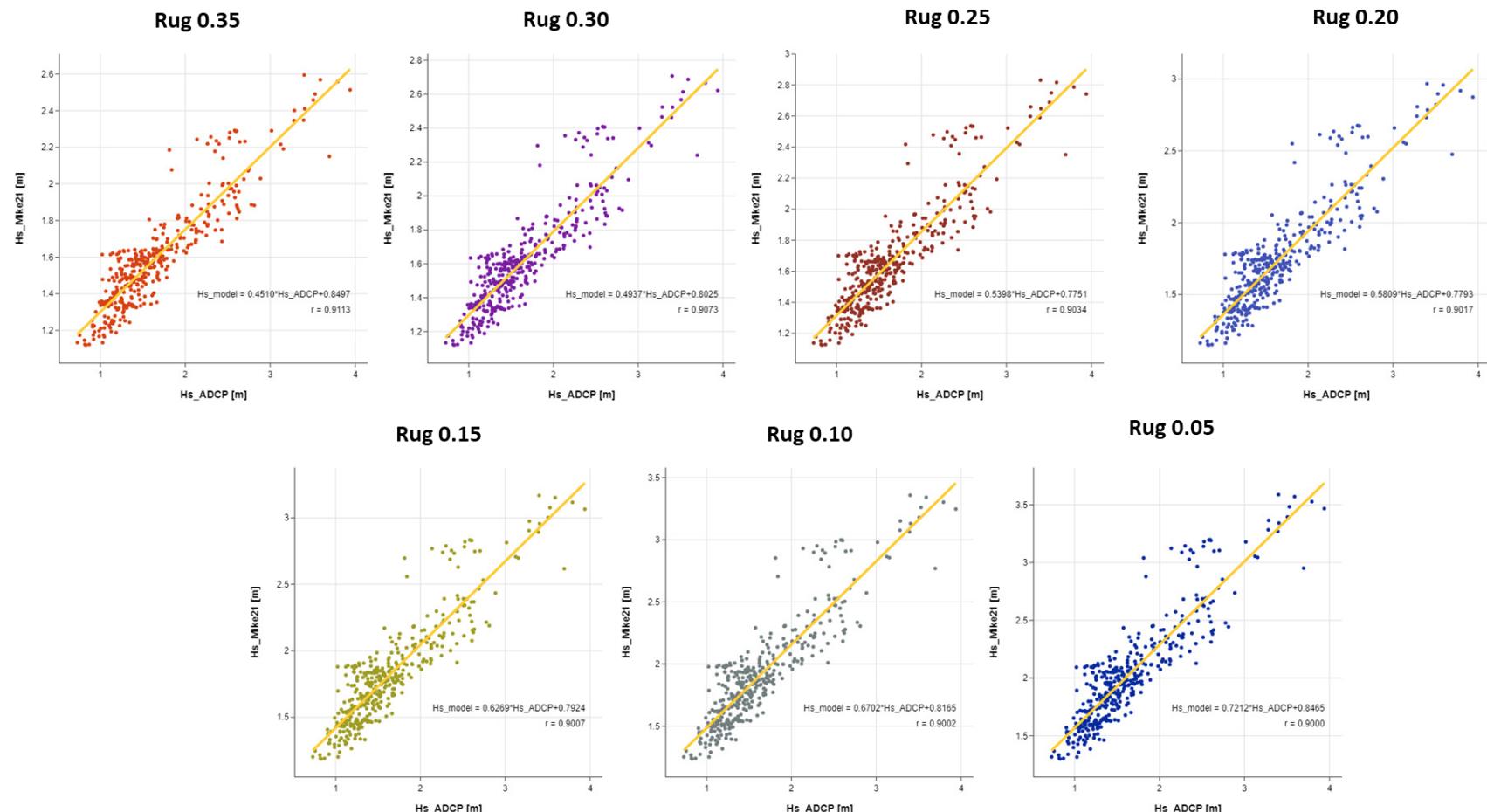


Figura 54

Correlación entre Hs_{ADCP} (Hs_{SWELL}) y Hs_{Mike21} (Hs_{Modelo}) para la rugosidad de 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10 y 0.05 – Segunda ubicación



En la tabla 4 se muestra los valores del coeficiente de Pearson (r), la pendiente (m) de la ecuación lineal ($H_s\text{Model}=m*H_s\text{ADCP} + b$) obtenida de la correlación, BIAS, RMSE, SI y PE, estos parámetros estadísticos nos permiten poder analizar con que valor de rugosidad se ajusta mejor la altura de ola reconstruida con la altura de ola registrada.

Tabla 4

Parámetros estadísticos r,m, BIAS, RMSE, SI y PE- Primera Ubicación.

| | Rugosidad | | | | | | |
|----------|--------------|--------|--------|---------------|--------------|--------|--------------|
| | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |
| r | 0.765 | 0.769 | 0.774 | 0.771 | 0.757 | 0.741 | 0.725 |
| m | 0.415 | 0.418 | 0.425 | 0.443 | 0.483 | 0.542 | 0.622 |
| BIAS (m) | -0.156 | -0.150 | -0.136 | -0.097 | 0.001 | 0.160 | 0.371 |
| RMSE (m) | 0.298 | 0.293 | 0.284 | 0.266 | 0.247 | 0.296 | 0.454 |
| SI | 0.302 | 0.296 | 0.283 | 0.255 | 0.216 | 0.228 | 0.300 |
| PE (%) | 22.181 | 21.980 | 21.659 | 21.510 | 24.373 | 34.504 | 52.097 |

Nota. Elaboración propia, se resaltaron los parámetros con mejor valor.

Tabla 5

Parámetros estadísticos r,m, BIAS, RMSE, SI y PE - Segunda Ubicación.

| | Rugosidad | | | | | | |
|----------|--------------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------------|
| | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |
| r | 0.873 | 0.873 | 0.870 | 0.859 | 0.831 | 0.811 | 0.798 |
| m | 0.464 | 0.465 | 0.466 | 0.474 | 0.523 | 0.600 | 0.700 |
| BIAS (m) | -0.128 | -0.124 | -0.116 | -0.094 | -0.012 | 0.158 | 0.392 |
| RMSE (m) | 0.269 | 0.267 | 0.263 | 0.255 | 0.235 | 0.282 | 0.460 |
| SI | 0.288 | 0.285 | 0.279 | 0.264 | 0.224 | 0.232 | 0.317 |
| PE (%) | 21.032 | 21.020 | 21.089 | 21.445 | 24.177 | 36.336 | 57.927 |

Nota. Elaboración propia, se resaltaron los parámetros con mejor valor.

Tabla 6

Parámetros estadísticos r,m, BIAS, RMSE, SI y PE - Tercera Ubicación.

| | Rugosidad | | | | | | |
|----------|--------------|---------------|--------|--------------|--------|--------|--------------|
| | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |
| r | 0.911 | 0.907 | 0.903 | 0.902 | 0.901 | 0.900 | 0.900 |
| m | 0.451 | 0.494 | 0.540 | 0.581 | 0.627 | 0.670 | 0.721 |
| BIAS (m) | -0.061 | -0.037 | 0.012 | 0.084 | 0.174 | 0.270 | 0.384 |
| RMSE (m) | 0.345 | 0.324 | 0.306 | 0.304 | 0.328 | 0.380 | 0.463 |
| SI | 0.216 | 0.200 | 0.183 | 0.174 | 0.179 | 0.197 | 0.227 |
| PE (%) | 18.195 | 18.007 | 18.641 | 20.741 | 24.383 | 29.080 | 35.232 |

Nota. Elaboración propia, se resaltaron los parámetros con mejor valor.

Adicional al cálculo de los parámetros estadísticos se procedió a comparar y calcular la diferencia de los valores mínimo, máximo y los percentiles de 25%, 50% y 75% de las alturas de olas medidas y modeladas para diferente valor de rugosidad, en la tabla 7, 8 y 9 se visualiza los valores calculados.

Tabla 7

Valor de Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Primera Ubicación.

| ADCP | Rugosidad | | | | | | |
|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |
| min | 0.397 | 0.594 | 0.598 | 0.606 | 0.612 | 0.628 | 0.633 |
| 25% | 0.816 | 0.830 | 0.836 | 0.851 | 0.889 | 0.980 | 1.129 |
| 50% | 1.117 | 0.971 | 0.979 | 1.001 | 1.036 | 1.141 | 1.296 |
| 75% | 1.456 | 1.117 | 1.124 | 1.140 | 1.183 | 1.291 | 1.475 |
| max | 2.325 | 1.639 | 1.639 | 1.639 | 1.640 | 1.841 | 2.141 |

Tabla 8

Valor de Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Segunda Ubicación.

| ADCP | Rugosidad | | | | | | |
|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |
| min | 0.4462 | 0.668 | 0.671 | 0.676 | 0.683 | 0.714 | 0.808 |
| 25% | 0.7084 | 0.752 | 0.756 | 0.764 | 0.781 | 0.831 | 0.965 |
| 50% | 1.0127 | 0.887 | 0.893 | 0.904 | 0.924 | 0.992 | 1.150 |
| 75% | 1.3019 | 1.062 | 1.070 | 1.084 | 1.127 | 1.206 | 1.421 |
| max | 2.4588 | 1.578 | 1.578 | 1.579 | 1.584 | 1.714 | 2.003 |

Tabla 9

Valor de Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Tercera Ubicación.

| ADCP | | Rugosidad | | | | | |
|------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 |
| min | 0.7299 | 1.119 | 1.120 | 1.120 | 1.148 | 1.186 | 1.236 |
| 25% | 1.2543 | 1.391 | 1.396 | 1.419 | 1.471 | 1.541 | 1.620 |
| 50% | 1.4929 | 1.562 | 1.575 | 1.617 | 1.682 | 1.772 | 1.860 |
| 75% | 1.9173 | 1.714 | 1.746 | 1.816 | 1.907 | 2.014 | 2.122 |
| max | 3.9390 | 2.594 | 2.707 | 2.831 | 2.966 | 3.168 | 3.587 |

Con los valores de altura de ola obtenido para diferente valor de rugosidad, se procedió

a realizar la diferencia y su error porcentual.

Tabla 10

Diferencia Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Primera Ubicación.

| | | Rugosidad | | | | | |
|-----|-------------|-----------|------|------|-------------|-------------|------|
| | | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 |
| min | 0.20 | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.39 |
| 25% | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.07 | 0.16 | 0.31 | 0.50 |
| 50% | 0.15 | 0.14 | 0.12 | 0.08 | 0.02 | 0.18 | 0.39 |
| 75% | 0.34 | 0.33 | 0.32 | 0.27 | 0.17 | 0.02 | 0.27 |
| max | 0.69 | 0.69 | 0.69 | 0.68 | 0.48 | 0.18 | 0.21 |

Tabla 11

Diferencia Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Segunda Ubicación.

| | | Rugosidad | | | | | |
|-----|-------------|-----------|------|------|-------------|------|-------------|
| | | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 |
| min | 0.22 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.27 | 0.36 | 0.51 |
| 25% | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.12 | 0.26 | 0.44 |
| 50% | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.02 | 0.14 | 0.36 |
| 75% | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.18 | 0.10 | 0.12 | 0.40 |
| max | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.87 | 0.74 | 0.46 | 0.07 |

Tabla 12

Diferencia Hs min, 25%, 50%, 75% y max - Tercera Ubicación.

| | | Rugosidad | | | | | | |
|-----|-------------|-----------|------|-------------|------|------|-------------|------|
| | | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |
| min | 0.39 | 0.39 | 0.39 | 0.42 | 0.46 | 0.51 | 0.57 | |
| 25% | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.22 | 0.29 | 0.37 | 0.46 | |
| 50% | 0.07 | 0.08 | 0.12 | 0.19 | 0.28 | 0.37 | 0.47 | |
| 75% | 0.20 | 0.17 | 0.10 | 0.01 | 0.10 | 0.21 | 0.33 | |
| max | 1.35 | 1.23 | 1.11 | 0.97 | 0.77 | 0.58 | 0.35 | |

De los parámetros estadísticos y las tablas mostradas podemos resumir lo siguiente:

- De la tabla 4 y 5, los parámetros estadísticos BIAS, RMSE y SI presentan el menor valor con una rugosidad de 0.15.
- De la tabla 6, los parámetros estadísticos BIAS, RMSE y SI presentan el menor valor con una rugosidad de 0.20.
- De las tablas 10, 11 y 12 el valor mínimo y percentil 25% presentan menor diferencia con la rugosidad de 0.35.
- Para los percentiles de 25%, 50% y 75% rugosidades entre 0.35 a 0.10 presenta diferencias menores a 0.30m.

De las tablas presentadas se puede comentar que las alturas de olas obtenidas del modelo para las 3 ubicaciones, las mayores diferencias se presentan en el valor mínimo y máximo, es por ello por lo que nos basaremos en los percentiles para determinar la rugosidad a utilizar para la reconstrucción del clima en los puntos TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9, TS10, TS11 y TS12.

En los modelamientos de propagación de oleaje diferencias entre altura de ola modelada y la altura de ola medida del orden de 0 a 0.30m se encuentran dentro de lo aceptable, si observamos la Tabla 10 y 11, para las ubicaciones 1 y 2 las rugosidades

entre 0.10 a 0.35 presenta diferencias menores a 0.30 mientras que para la ubicación 3 rugosidades entre 0.15 a 0.35 cumplen con esta condición.

Para el cálculo de transporte es más adecuado determinar su comportamiento en base a estados de mar más energéticos, teniendo esta premisa tomaremos en cuenta las diferencias en los percentiles de 50%, 75% y el valor máximo llegando a la conclusión que la rugosidad de 0.10 es la que mejor se ajusta, adicionalmente se realizará la reconstrucción del clima con la rugosidad de 0.05 dado que es el que mejor se ajusta con los picos de altura de ola registrados en campo.

Antes de presentar la comparativa entre la altura de ola, periodo pico y dirección media entre los datos medidos y modelados es importante comentar nuevamente la multimodalidad del oleaje que caracteriza a esta zona del pacífico. Como se indicó en el punto **3.6.1.1.4 Características generales oleaje en el litoral peruano.**

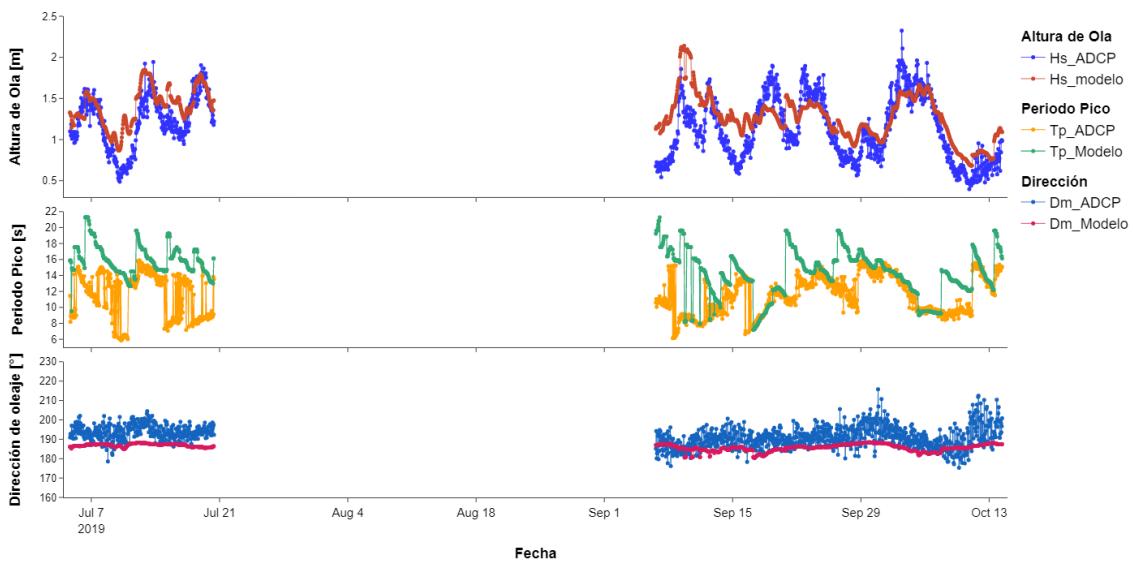
Esto implica que al realizar un modelamiento de propagación de olas con parámetros de oleaje (H_s , T_p y D_m) representativos de un estado de mar no es posible analizar la multimodalidad en nuestra zona de estudio, obteniendo así diferencias entre lo medido y modelado.

A continuación, se muestra la superposición de series de tiempo de altura de ola, periodo pico y dirección media entre los datos medidos y modelados para una rugosidad de 0.10.

Figura 55

Superposición de series de tiempo H_s , T_p y D_m entre los datos medidos y modelados –

Primera ubicación.

**Figura 56**

Superposición de series de tiempo H_s , T_p y D_m entre los datos medidos y modelados –

Segunda ubicación.

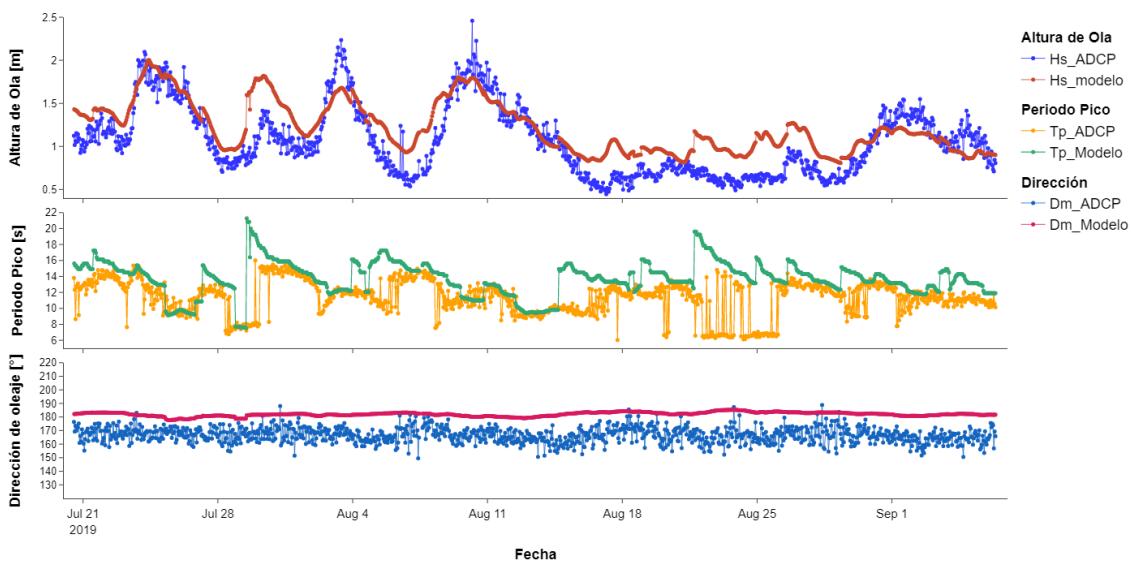
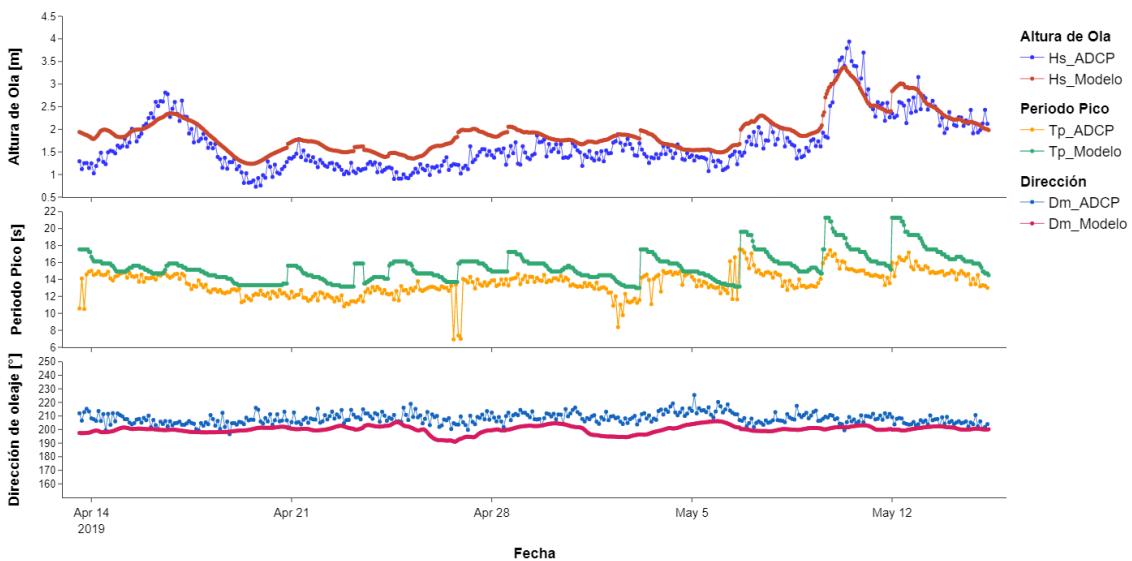


Figura 57

Superposición de series de tiempo Hs, Tp y Dm entre los datos medidos y modelados –

Tercera ubicación.



Para el cálculo de la tasa anual del transporte potencial longitudinal de sedimentos se procedió a realizar la reconstrucción del clima utilizando los valores de Hs, Tp y Dm obtenidos del modelo de propagación de oleaje utilizando una rugosidad de 0.10 y 0.05 en los puntos TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9, TS10, TS11 y TS12 que se encuentran a 360m de la línea de costa del tramo de estudio y a una profundidad que oscila entre 6 a 8 metros, estos puntos fueron ubicados lo más cercano a la zona de rompiente.

Las reconstrucciones de clima de olas se obtuvieron mediante una interpolación bicúbica y se utilizó la dirección media y dirección pico de la base de datos de aguas profundas para poder visualizar el comportamiento de la dirección del frente de oleaje en el tramo de estudio.

Figura 58

Vista en planta de la ubicación de los puntos de reconstrucción sobre ortofoto Google Earth.



De los puntos de reconstrucción se procedió a calcular para la altura de ola y dirección su valor mínimo, percentil 25%, percentil 50%, percentil 75% y valor máximo para identificar el comportamiento del oleaje en nuestro tramo de estudio.

Tabla 13

Valores altura de ola mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando una Dirección media.

| Puntos | Altura de Ola | | | | |
|--------|---------------|------|------|------|--------|
| | mínimo | 25% | 50% | 75% | máximo |
| TS1 | 0.25 | 0.89 | 1.06 | 1.26 | 2.34 |
| TS2 | 0.34 | 1.02 | 1.20 | 1.42 | 2.55 |
| TS3 | 0.45 | 1.03 | 1.20 | 1.41 | 2.58 |
| TS4 | 0.49 | 1.06 | 1.23 | 1.44 | 2.54 |
| TS5 | 0.52 | 1.00 | 1.16 | 1.35 | 2.41 |
| TS6 | 0.51 | 1.00 | 1.16 | 1.35 | 2.29 |
| TS7 | 0.54 | 1.08 | 1.25 | 1.46 | 2.62 |
| TS8 | 0.59 | 1.16 | 1.35 | 1.58 | 2.78 |
| TS9 | 0.59 | 1.14 | 1.32 | 1.54 | 2.77 |
| TS10 | 0.58 | 1.13 | 1.30 | 1.51 | 2.64 |
| TS11 | 0.58 | 1.13 | 1.31 | 1.52 | 2.67 |
| TS12 | 0.58 | 1.11 | 1.28 | 1.49 | 2.61 |

Tabla 14

Valores dirección de oleaje mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos

utilizando una Dirección media.

| Puntos | Dirección | | | | |
|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| | mínimo | 25% | 50% | 75% | máximo |
| TS1 | 177.05 | 187.64 | 188.57 | 189.38 | 201.49 |
| TS2 | 178.69 | 190.79 | 191.95 | 192.98 | 203.10 |
| TS3 | 181.37 | 196.95 | 198.72 | 200.26 | 209.90 |
| TS4 | 182.86 | 200.14 | 202.16 | 203.94 | 212.17 |
| TS5 | 183.08 | 202.26 | 204.96 | 207.35 | 217.32 |
| TS6 | 181.95 | 198.64 | 201.58 | 204.22 | 215.11 |
| TS7 | 185.64 | 197.80 | 200.62 | 203.22 | 219.36 |
| TS8 | 186.80 | 201.03 | 203.79 | 206.31 | 222.81 |
| TS9 | 188.26 | 201.53 | 204.10 | 206.47 | 221.63 |
| TS10 | 191.58 | 205.53 | 208.05 | 210.36 | 225.79 |
| TS11 | 193.69 | 208.09 | 210.61 | 212.92 | 230.26 |
| TS12 | 194.12 | 205.75 | 208.20 | 210.48 | 229.75 |

Tabla 15

Valores altura de ola mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando

una Dirección pico.

| Puntos | Altura de Ola | | | | |
|--------|---------------|------|------|------|--------|
| | mínimo | 25% | 50% | 75% | máximo |
| TS1 | 0.25 | 0.89 | 1.06 | 1.26 | 2.34 |
| TS2 | 0.34 | 1.02 | 1.20 | 1.42 | 2.55 |
| TS3 | 0.45 | 1.03 | 1.20 | 1.41 | 2.58 |
| TS4 | 0.49 | 1.06 | 1.23 | 1.44 | 2.54 |
| TS5 | 0.52 | 1.00 | 1.16 | 1.35 | 2.41 |
| TS6 | 0.51 | 1.00 | 1.16 | 1.35 | 2.29 |
| TS7 | 0.54 | 1.08 | 1.25 | 1.46 | 2.62 |
| TS8 | 0.59 | 1.16 | 1.35 | 1.58 | 2.78 |
| TS9 | 0.59 | 1.14 | 1.32 | 1.54 | 2.77 |
| TS10 | 0.58 | 1.13 | 1.30 | 1.51 | 2.64 |
| TS11 | 0.58 | 1.13 | 1.31 | 1.52 | 2.67 |
| TS12 | 0.58 | 1.11 | 1.28 | 1.49 | 2.61 |

Tabla 16

Valores dirección de oleaje mínima, 25%, 50%, 75% y máximo de los puntos reconstruidos utilizando una Dirección pico.

| Puntos | Dirección | | | | |
|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| | mínimo | 25% | 50% | 75% | máximo |
| TS1 | 177.05 | 187.64 | 188.57 | 189.38 | 201.49 |
| TS2 | 178.69 | 190.79 | 191.95 | 192.98 | 203.10 |
| TS3 | 181.37 | 196.95 | 198.72 | 200.26 | 209.90 |
| TS4 | 182.86 | 200.14 | 202.16 | 203.94 | 212.17 |
| TS5 | 183.08 | 202.26 | 204.96 | 207.35 | 217.32 |
| TS6 | 181.95 | 198.64 | 201.58 | 204.22 | 215.11 |
| TS7 | 185.64 | 197.80 | 200.62 | 203.22 | 219.36 |
| TS8 | 186.80 | 201.03 | 203.79 | 206.31 | 222.81 |
| TS9 | 188.26 | 201.53 | 204.10 | 206.47 | 221.63 |
| TS10 | 191.58 | 205.53 | 208.05 | 210.36 | 225.79 |
| TS11 | 193.69 | 208.09 | 210.61 | 212.92 | 230.26 |
| TS12 | 194.12 | 205.75 | 208.20 | 210.48 | 229.75 |

Figura 59

Rosas de Oleaje de los puntos reconstruidos sobre ortofoto Google Earth utilizando la dirección media.

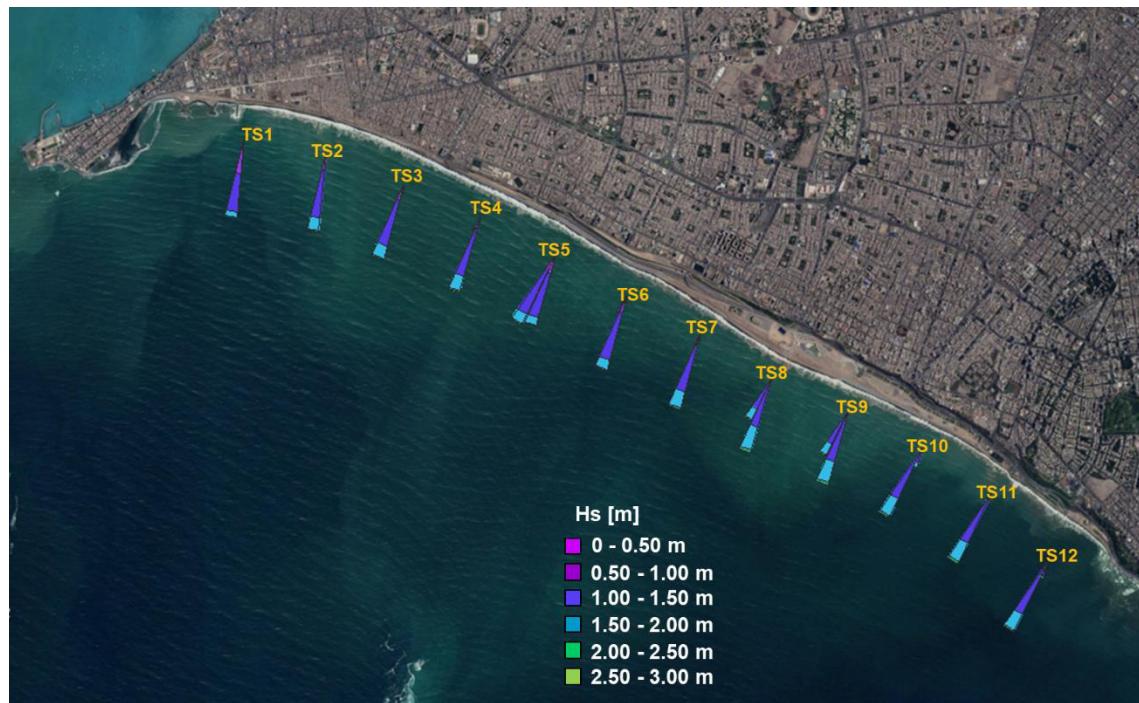
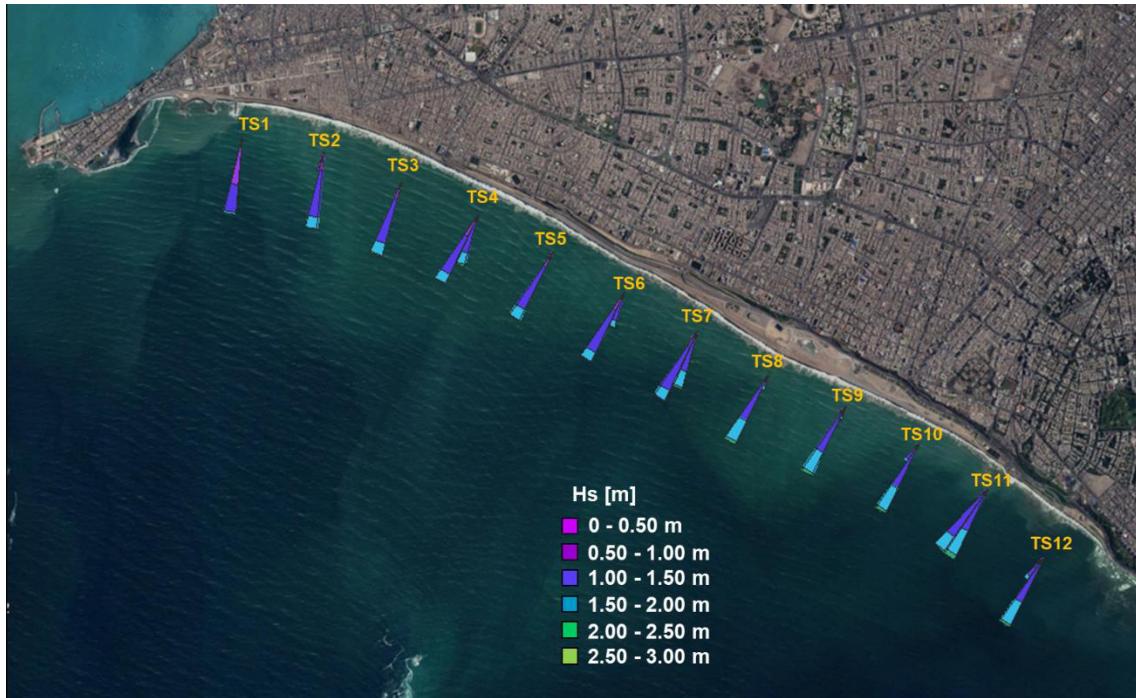


Figura 60

Rosas de Oleaje de los puntos reconstruidos utilizando la dirección pico.



De la siguiente información se puede comentar lo siguiente:

- De la tabla 13 y 15 podemos visualizar que las alturas de olas de los puntos reconstruidos son un poco mayores utilizando la dirección media para la reconstrucción del clima.
- En el punto TS1 y TS12 se puede visualizar que presenta menor valor debido al abrigo que produce la isla del frontón y la punta la chira respectivamente.
- En el tramo donde se ubica los puntos TS7, TS8, TS9, TS10 y TS11 se presenta el oleaje más intenso debido a que los oleajes provenientes del SSO - SO penetran directamente y son los que se presentan en casi toda la época del año.
- En la figura 56 se puede visualizar que los puntos TS5 y TS6 se encuentran ubicados a cada lado del hemitombolo que se genera por la presencia de las islas horadadas, de las tablas 13 y 15 se puede visualizar que sus alturas disminuyen debido al pequeño abrigo que genera las islas horadadas.

- De la tabla 14 y 16 y apoyándonos en las figuras 33 y 34 se puede observar que la dirección tiende un poco más hacia al sur utilizando la dirección media frente a la dirección pico, esto nos lleva nuevamente a la importancia de introducir en los modelos espectros de oleaje medidos en aguas profundas para poder representar la multimodalidad en el tramo de aguas someras o poco profundas.

3.6.1.7 Morfodinámica Litoral.

Para poder realizar el estudio del transporte de los sedimentos granulares que constituyen el fondo somero de la costa y que se desplazan por el efecto del oleaje y las corrientes generadas por el oleaje en la zona de rompiente, es necesario realizar un diagnóstico de la morfodinámica litoral de manera que nos permita identificar los límites de la Unidad Fisiográfica sedimentaria litoral en la que se enmarca el área de estudio.

3.6.1.7.1 Identificación de los Límites de la Unidad Fisiográfica Sedimentaria Litoral

El tramo de estudio se encuentraemplazada en el sector central – norte de la bahía de Miraflores a aproximadamente 06 km al norte del morro solar y a unos 02 km al sur de la Punta callao, entre las desembocaduras del río Rímac por el sur y el río Lurín por el norte, los cuales a su vez están enmarcados dentro de la “unidad fisiográfica litoral”.

En la figura 61 se intenta representar el comportamiento de ese tramo litoral, donde se simbolizan las fuentes de sedimentos que entran al sistema: fluviales (flechas azules) y rellenos de desmontes (flechas en rojo), las barreras totales al transporte de sedimentos (símbolo prohibido) y la dirección media del oleaje responsable de las corrientes de deriva que de manera general transportan el sedimento Sur – Norte.

Figura 61

Esquema de funcionamiento de la unidad fisiográfica en nuestro tramo de estudio.



Nota. Fuente INMAR, elaborado sobre ortofoto SENTINEL.

3.6.1.7.2 Identificación de Fuentes de Sedimentos

Las fuentes de sedimentos para el tramo de estudio son de 04 tipos: Aportes de los cauces fluviales, erosión de las terrazas aluviales, rellenos artificiales con material de desmonte y acción del viento sobre los terrenos aluviales.

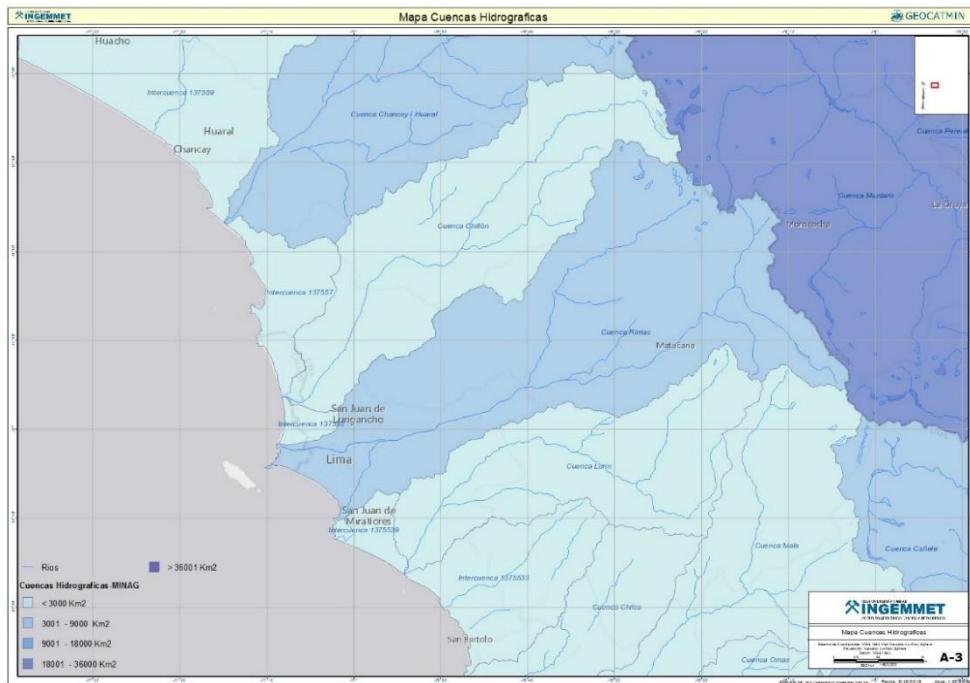
El tramo de estudio se encuentra ubicado sobre la cuenca del río Rímac. Se trata de un cauce fluvial estacional con un régimen muy variable, con descargas en la época estival (diciembre a mayo) y una prolongada época con aportes inexistentes o poco

significativos de mayo a diciembre; con eventos torrenciales muy intensos durante el fenómeno ENSO (hiperestacionales).

Al igual que todos los ríos costeros del Perú, caracterizados por su estacionalidad y régimen muy variable, los tamaños de los sedimentos aportados son muy heterogéneos predominando las gravas y arenas. Sin embargo, durante los eventos extraordinarios asociados al fenómeno ENSO (por el incremento significativo de las precipitaciones) se producen intensas avenidas que arrastran gran cantidad de materiales finos (arenas eólicas, limos y arcillas depositados en las zonas de inundación del cauce) generando un flujo de agua cargado de material en suspensión tipo lodo. Se producen en su desembocadura grandes acumulaciones de estos sedimentos, siendo las fracciones más finas las primeras en ser transportadas por el oleaje y las corrientes, depositándose en las zonas más profundas (donde decantan). Los materiales de tamaño medio (arenas) se depositan en la zona de perfil activo de la playa y son paulatinamente transportados por la corriente de deriva y transversal en función del régimen energético del oleaje. Los materiales gruesos (gravas y cantos rodados) tienden a quedarse concentrados en las proximidades de la desembocadura, con un acarreo muy lento solamente en presencia de oleajes muy intensos.

Figura 62

Principales cauces fluviales con sus cuencas hidrográficas en la región de Lima.



Nota. Adaptado de INGEMMET. (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>)

En la actualidad solo el río Rímac aporta sedimentos mientras que el río surco visualizado en la figura XX ha sido canalizado para uso urbano y para el riego de cultivos.

Debido a las obras de regulación y canalización de los ríos es muy difícil cuantificar los sedimentos debido a que no existen estaciones que registren estos datos.

Con respecto a la erosión marina de las terrazas aluviales, constituyó otra fuente de sedimentos relevante. La formación de La Punta – Callao y los bajos del camotal se produjo por la erosión de las terrazas aluviales de la Bahía de Miraflores, compuestas por materiales poco consolidados que se depositaban al pie de los acantilados y la corriente de deriva generada por la incidencia oblicua del oleaje acarreaba de sur a norte. Debido a que se ha realizado rellenos desde los años 70 al pie de estos acantilados para construir la vía expresa Costa Verde en la actualidad la erosión de los acantilados ya no es una fuente de sedimentos.

Figura 63

Vista de terrazas aluviales en la zona de Magdalena año 1960.



Nota. Adaptado de Estudios de la protección del litoral de las bahías del callao y de Miraflores – Société Grenobloise D'études et D'applications Hydrauliques.

Con respecto a los rellenos con material de desmonte, como se comentó anteriormente esto se inició desde los años 70 con el fin de crear la vía expresa Costa Verde, se construyeron espigones retenedores para así retener el sedimento y se genere kilómetros de playa.

En los últimos años se viene realizando rellenos considerables desde San Isidro a La Perla con material de desmonte y demolición. Los rellenos fueron realizando sin ninguna obra de protección frente a la intensidad del oleaje, por lo que, al estar constituido el material por gravas, cantos rodados y finos cuando existe presencia de oleajes intensos o energéticos produce el lavado de los finos, depositando los materiales gruesos al pie del relleno e introduciendo enormes plumas de turbidez con material fino en suspensión que las corrientes de marea y viento transportan.

Figura 64

Ortofotos del año 2003 y 2017 del tramo San Isidro La Perla.



Nota. Elaboración propia, en la imagen se puede observar el ancho relleno al pie de las terrazas aluviales.

De acuerdo con lo comentado si bien ya no existe erosión de las terrazas aluviales, el actual aporte de sedimentos son los rellenos de material de desmonte. Este aporte sedimentario se distribuye de manera lenta pero constante, potenciado en temporadas con oleajes energéticos.

El viento como agente que transporta sedimentos es prácticamente despreciable ya que no se cuenta con superficies aluviales cubiertas de arena fina debido a que nuestro tramo de estudio se encuentra urbanizado.

Como conclusión, se puede afirmar que las fuentes principales de sedimentos son de 3 tipos:

- Cauces fluviales, cuya aportación se ha ido reduciendo con el pasar de los años por la regulación de los ríos.
- Erosión de los rellenos de desmonte depositados al pie de las terrazas aluviales que se han realizado en las últimas décadas.

3.6.1.7.3 Evolución Línea de Costa

A continuación, se presenta un análisis de la variación de la línea de costa desde el año 2004 hasta 2021, mediante superposición de ortofotos. Lo que nos ha permitido identificar cualitativamente las acumulaciones y erosiones de sedimentos en los últimos años, asumiendo los errores inherentes a usar ortofotos con diferente nivel de marea y distintas condiciones de oleaje.

En la Figura 65 se presenta la variación de la línea de costa desde Magdalena hasta Callao, entre 2004 y 2022. De color rojo se sombra la zona donde se ha producido aumento y en azul retroceso. Se puede observar el considerable aumento en el litoral de Magdalena y San Miguel por los rellenos realizados en esta zona, que el oleaje ha modelado y transportado paulatinamente una parte hacia la zona del Callao.

En la figura 66 en el 2004 no había presencia de rellenos (San Miguel – Magdalena) mientras que para el año 2009 hubo un incremento en la zona de San Miguel producto de algún tipo de relleno ya que como se había comentado no existe aporte relevante de sedimento por parte de los ríos que conforman su unidad fisiográfica, en el tramo de san isidro y de la perla existe una erosión corroborando que la sedimentación es producto de algún tipo de relleno.

En la figura 66 del 2009 al 2011 se puede observar que el tramo donde hubo relleno se distribuyó a lo largo de casi toda la línea de costa perfilándose hasta encontrarse en estado de equilibrio, al parecer no hubo rellenos considerables durante estos 02 años.

En la figura 67 del 2011 al 2012 hubo nuevamente un relleno y las zonas que antes ganaron terreno al mar fueron erosionadas.

En la figura 71 se puede observar que existe un pequeño hemitombolo producto por los frentes de oleaje que cruzan con las islas horadadas. Lo que ocasiona una diferente distribución del material relleno hacia el lado del callao.

Figura 65

Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Enero 2004 – Marzo 2022

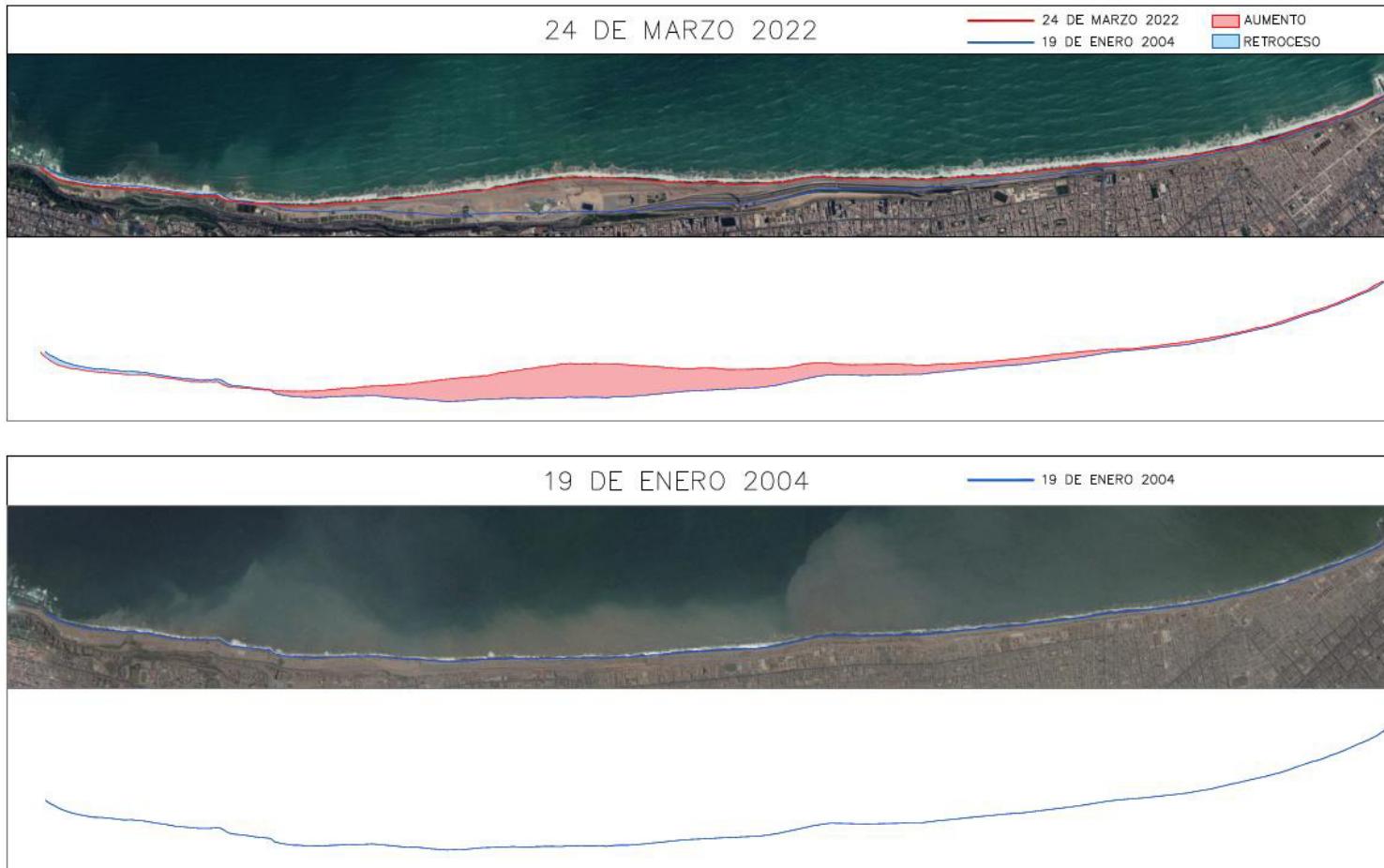


Figura 66

Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Enero 2009 – Marzo 2011

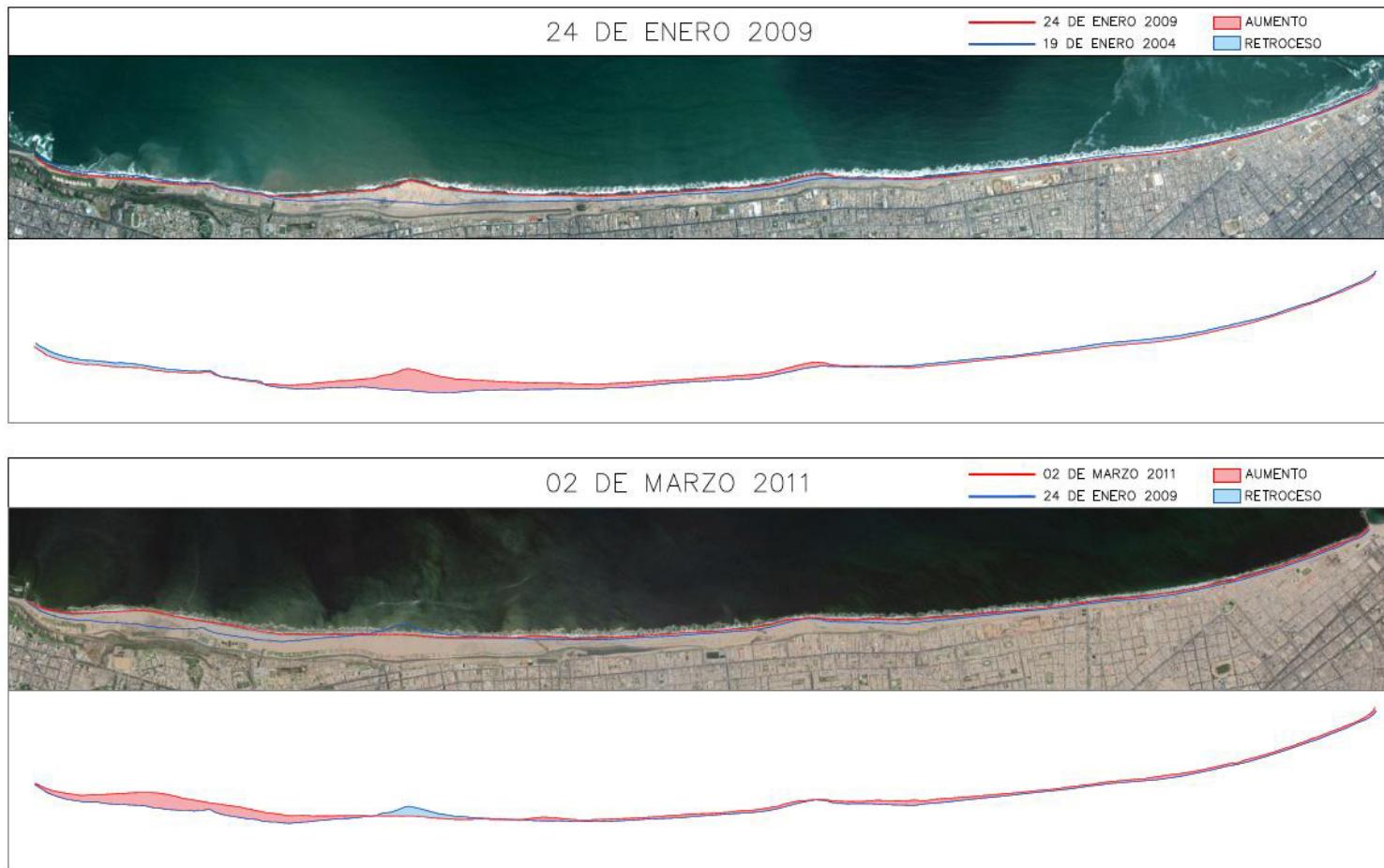


Figura 67

Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Abril 2012 – Enero 2013

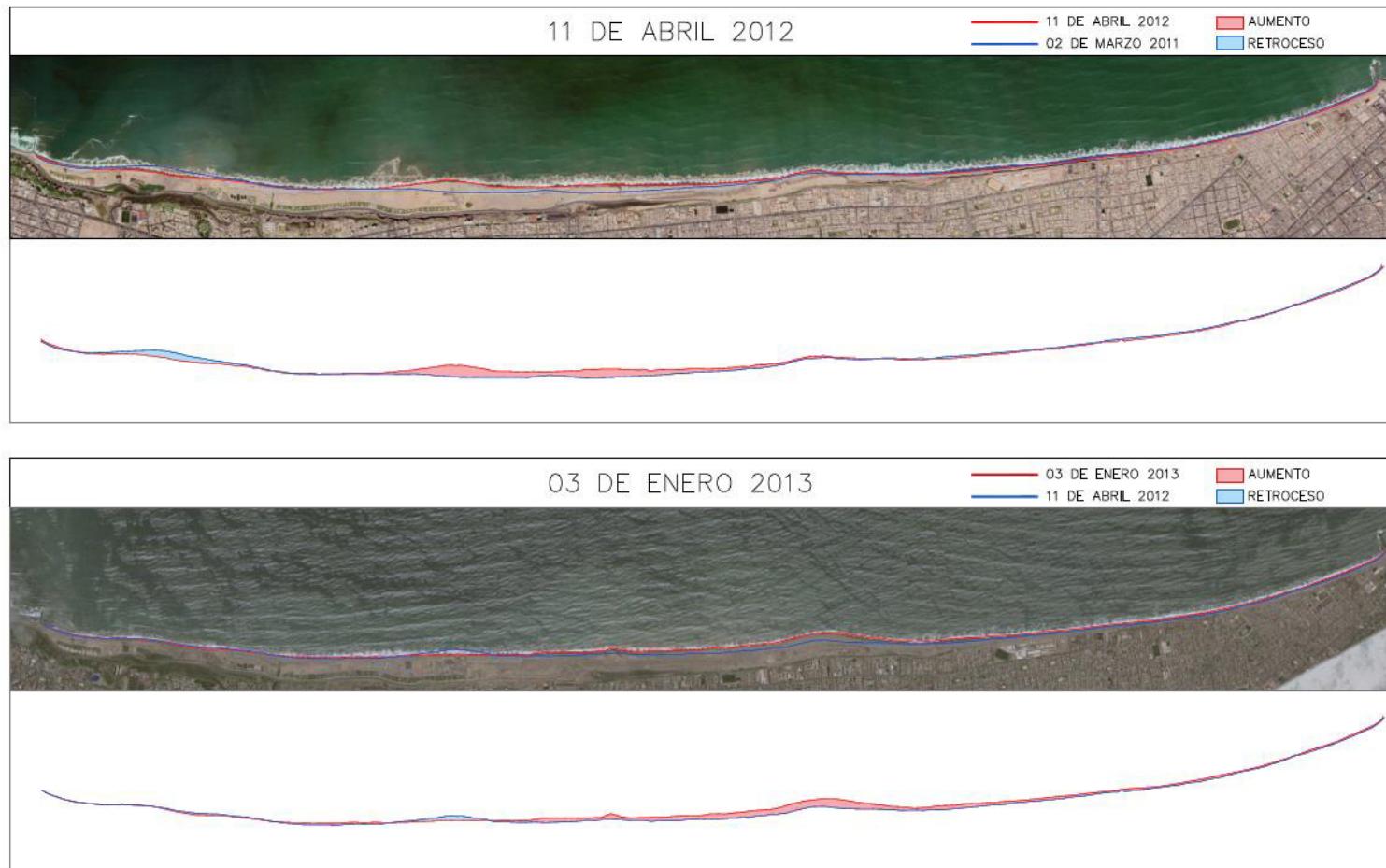


Figura 68

Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Abril 2014 – Mayo 2016

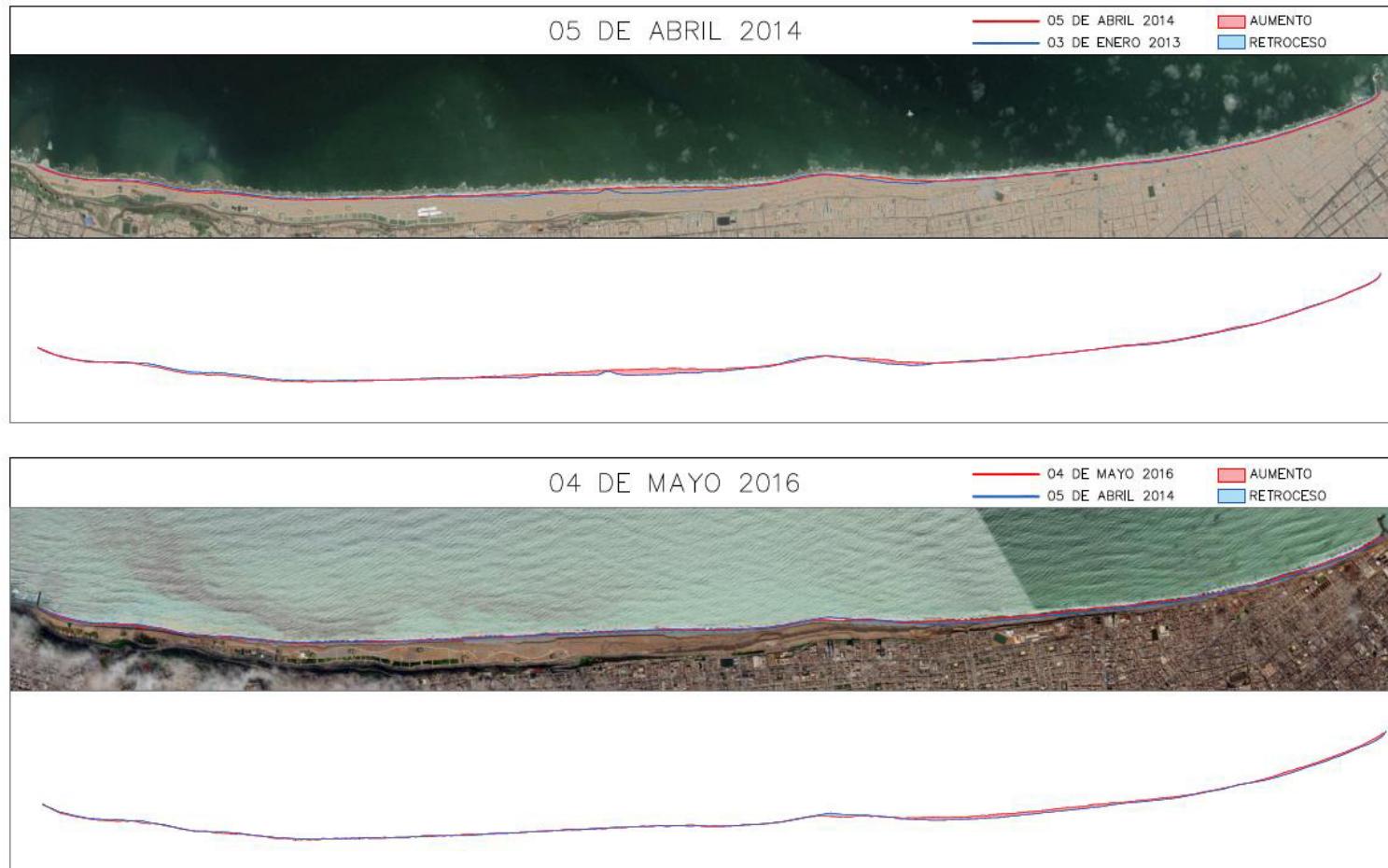


Figura 69

Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Marzo 2017 – Mayo 2018

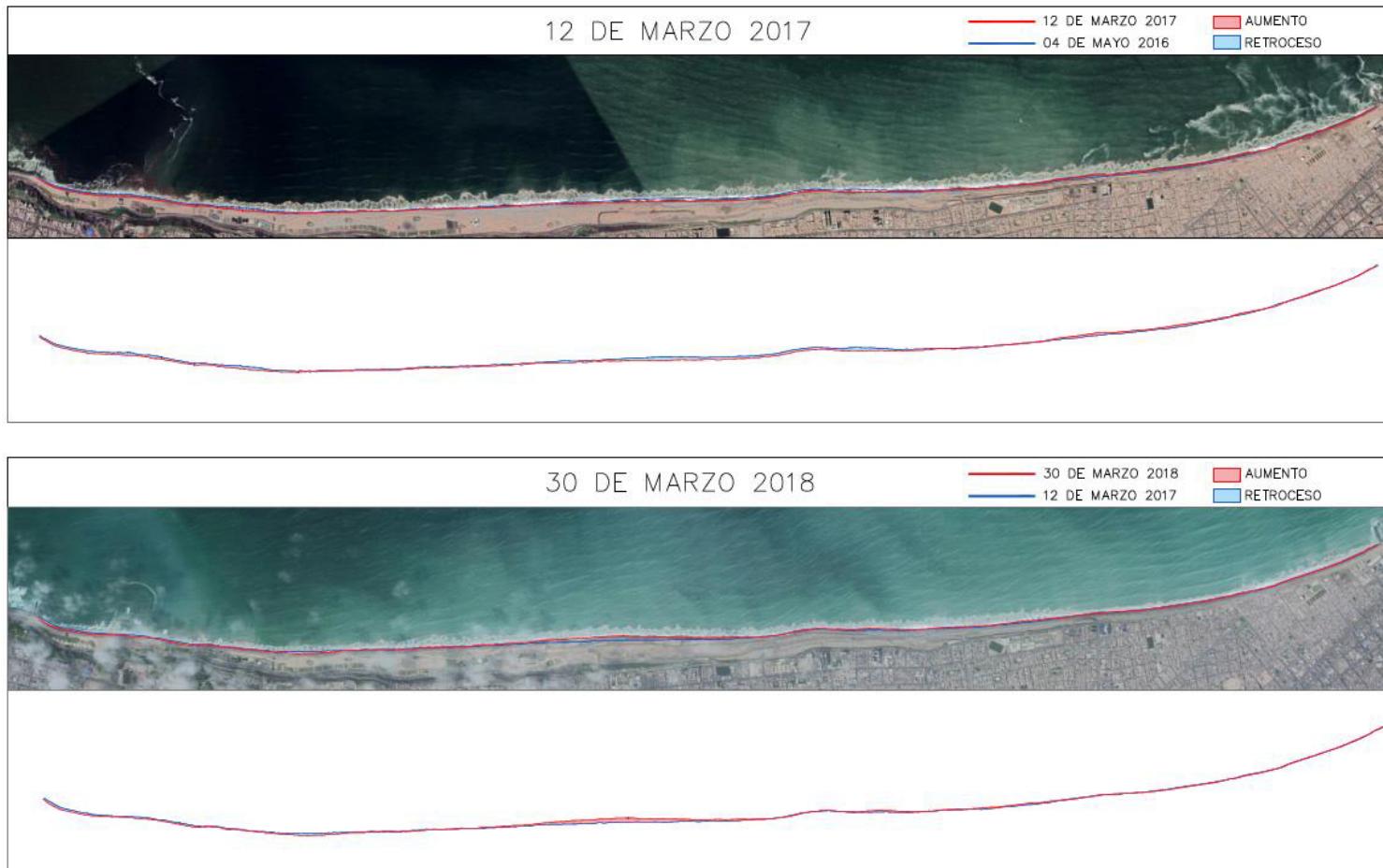


Figura 70

Evolución línea de costa entre playa Los Delfines y playa Mar Brava. Marzo 2020 – Marzo 2022

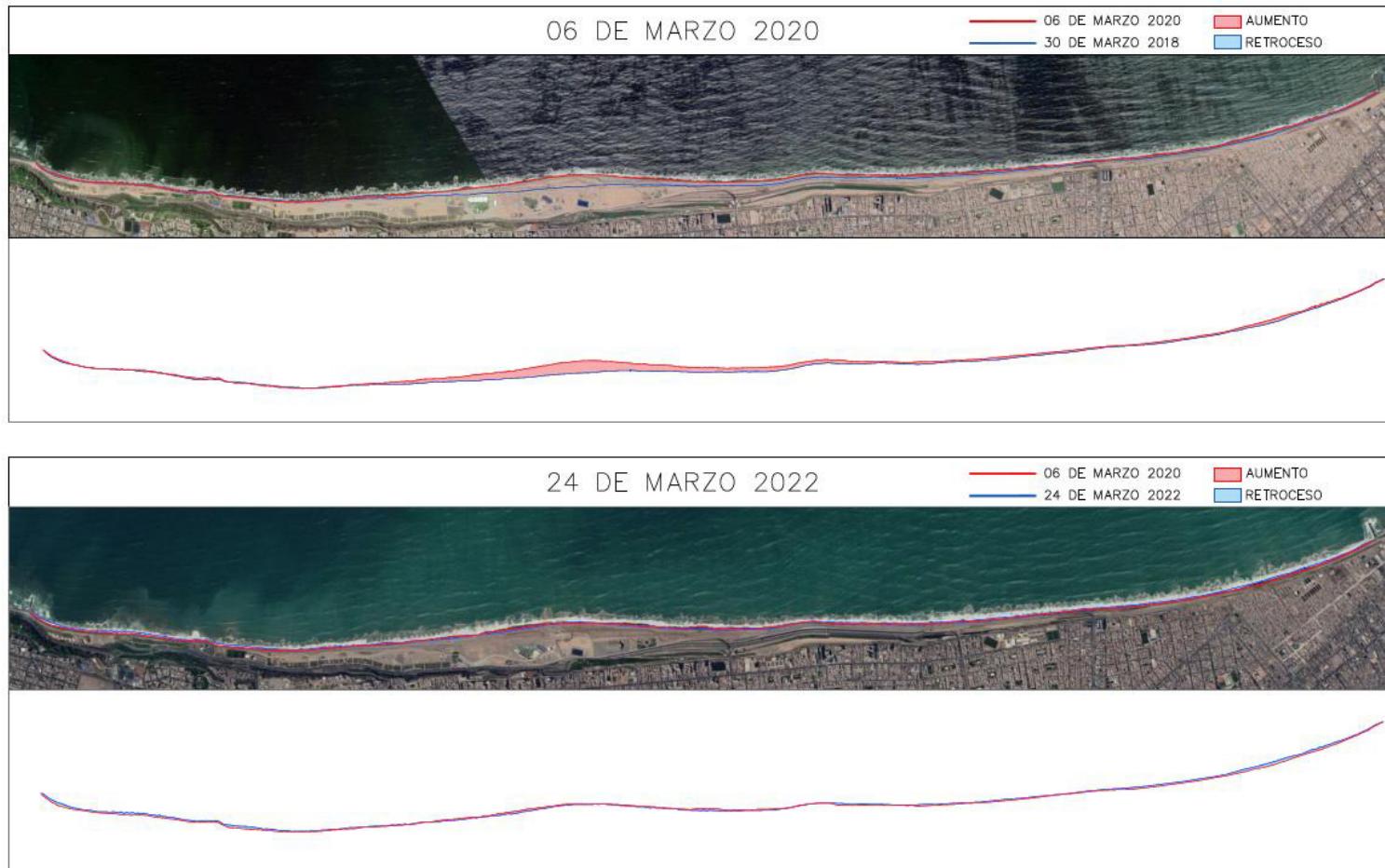


Figura 71

Ortofoto del 09 de abril 2013



Nota. Adaptado de INMAR

En la figura 68 del 2014 al 2016 se observa un retroceso en la zona de Magdalena – San Miguel verificándose un transporte hacia el tramo del Callao.

Este ciclo de sedimentación y erosión se puede observar para los siguientes años 2017, 2018, 2020 y 2022.

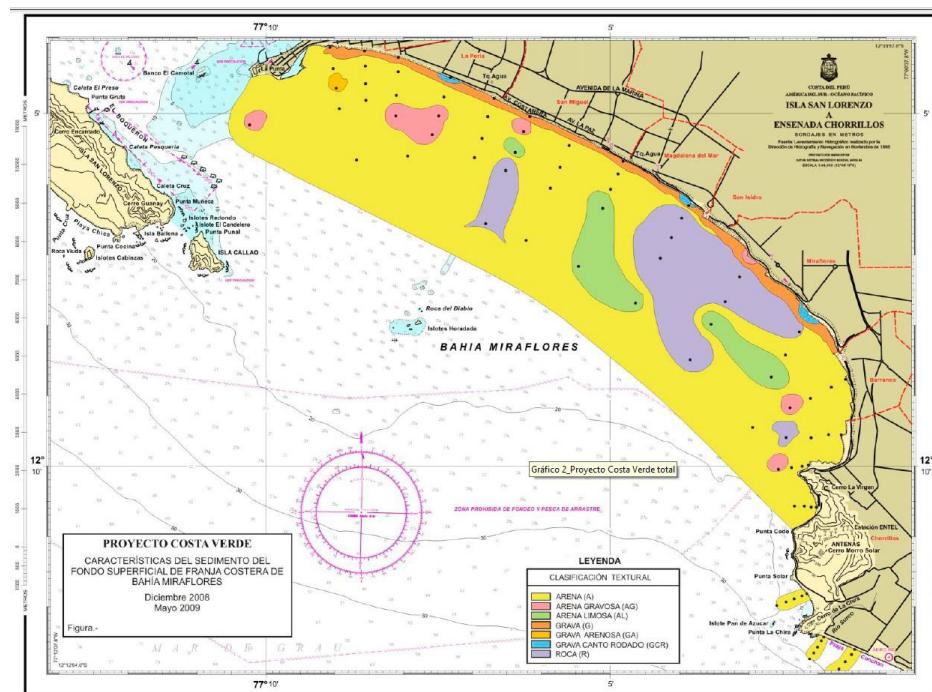
De acuerdo con esta variabilidad (aumento y retroceso) en el tramo de línea de costa se puede comentar que todavía no llega alcanzar su estado de equilibrio dado que el oleaje seguirá constantemente transportando los finos y en especial las gravas (en un proceso lento) hacia el tramo del Callao.

3.6.1.7.4 Estimación de la Tasa de Transporte Longitudinal de Sedimentos

Para determinar el tipo de tamaño del sedimento en el tramo de estudio se recurrió a información de la campaña que realizó la Dirección hidrografía y Navegación en el año 2009.

Figura 72

Caracterización de sedimentos superficiales de la franja costera de la bahía de Lima



Nota. Adaptado de la Dirección de Hidrografía y Navegación

Tabla 17

Diámetro medio de sedimentos superficiales de la franja costera de la bahía de Miraflores.

| Distrito | Referencia | Estación | D50 (mm) | D90 (mm) |
|----------------------------|--------------|----------|----------|----------|
| Playa Grande | | P9T | 27000 | 60000 |
| | | P9A | 0.12 | 0.15 |
| | | P9B | 0.13 | 0.4 |
| | | P9C | 0.12 | 0.14 |
| Distrito San Miguel | Playa Grande | P10T | 52000 | 70000 |
| | | P10A | 0.5 | 37000 |
| | | P10B | 0.1 | 0.14 |
| | | P10C | 70000 | 150000 |
| Distrito La Perla - Callao | Playa Grande | P10D | 70000 | 95000 |
| | | P11T | 15000 | 30000 |
| | | P11A | 0.13 | 0.8 |
| | | P11B | 0.13 | 0.17 |
| | | P11C | 0.12 | 0.14 |
| | | P12T | 25000 | 780000 |
| | | P12A | 0.12 | 0.17 |
| | | P12B | 0.14 | 28000 |
| | | P12C | 0.14 | 6500 |

| | | | |
|--------------------------|------|-------|--------|
| | P12D | 0.13 | 0.15 |
| | P13T | 34000 | 58000 |
| Playa Mar | P13A | 0.13 | 0.15 |
| Brava | P13B | 0.13 | 0.15 |
| | P13C | 0.31 | 12000 |
| | P14T | 27000 | 330000 |
| Playa Mar | P14A | 0.13 | 0.15 |
| Brava | P14B | 0.13 | 0.18 |
| | P14C | 0.12 | 0.14 |
| | P15T | 33000 | 58000 |
| | P15A | 0.12 | 0.15 |
| Playa Carpayo | P15B | 4000 | 28000 |
| | P15C | 0.13 | 0.15 |
| | P15D | 0.12 | 0.15 |

Nota. Adaptado de Dirección Hidrografía y Navegación.

Como se puede observar, el tramo de Callao tiene un diámetro medio $D50= 25$ a 34 mm en la zona de gravas y un diámetro medio $D50= 0.12$ a 0.14 mm en la zona de arena. En el tramo de San Miguel, las gravas tienen $D50= 15$ a 70 mm y las arenas $D50= 0.1$ a 0.13 mm.

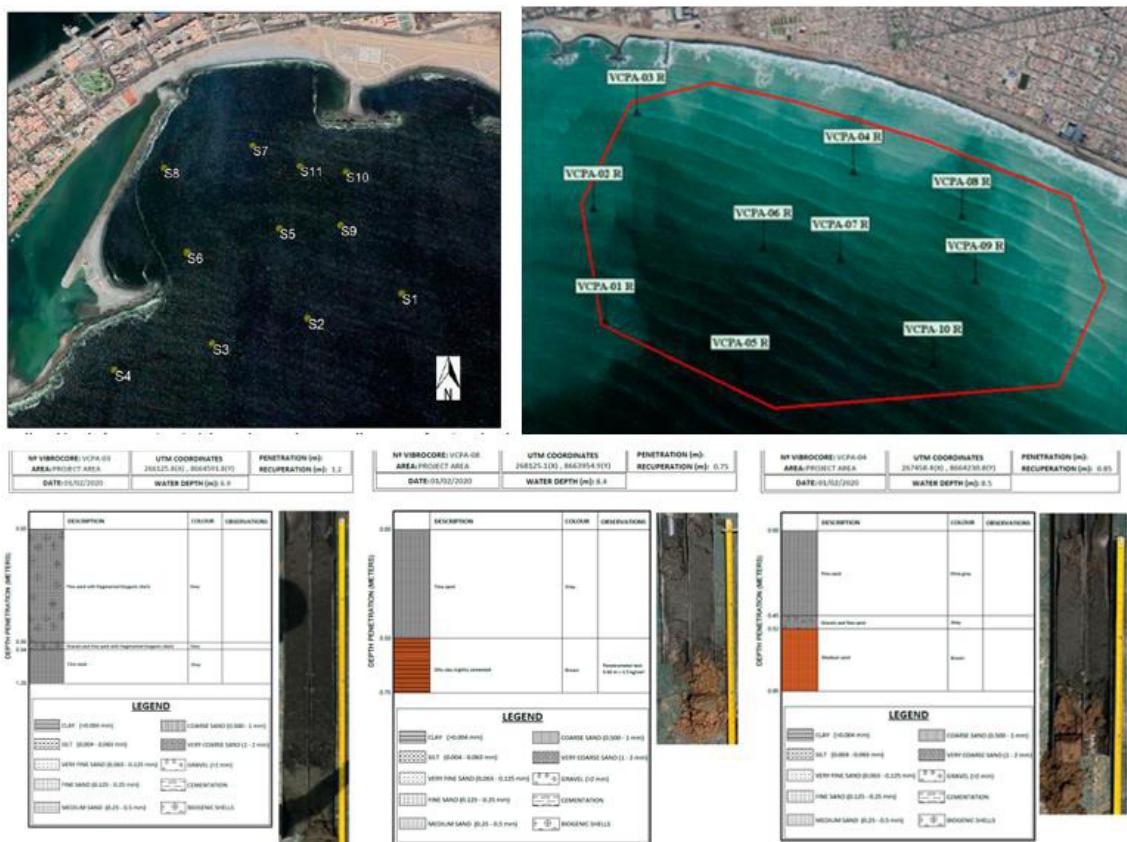
Además, se han consultado otros estudios realizados por INMAR-GEOMYTSA en el área, en concreto una campaña de extracción muestras subsuperficiales con vibrocorer de finales del 2020. En la zona norte (Carpayo) el tramo de arenas finas se extiende en profundidad con presencia de conchuela y capas de grava; en la zona central y hacia el sur (San Miguel) la capa de arenas finas solo tiene 50 cm y subyace una capa de gravas de 10 cm y a continuación una capa de arcilla compacta.

Con la información disponible, aproximadamente se puede decir que el tramo de gravas se extiende en un ancho de 50-60 m desde la orilla hasta la -2 a -5 m con una pendiente media del 10% al 20% y a continuación aparece el tramo de arenas con una pendiente media del 1%. La capa de arenas finas en el tramo central tiene escasa potencia y

subyace una capa de arcillas, en la zona norte la capa de arenas se alterna con gravas y conchuela.

Figura 73

Campañas de caracterización subsuperficial realizadas por INMAR – GEOMYTSA en 2019 – 2020.



Nota. Adaptado de INMAR - GEOMYTSA

Utilizando las fórmulas de Van Rijn y Kamphius modificada (2013) descritas en el punto **3.6.1.3.2 Tasa de Transporte de Sedimentos** se ha calculado la tasa anual de transporte potencial de sedimentos en cada uno de los puntos de control (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9, TS10, TS11 y TS12) utilizando las hojas de cálculo (de acceso libre) elaboradas en el estudio “Simple assessments of Coastal Problems and Design of Adaptation and Disaster Risk Management Solutions” (<http://www.simplecoast.com/>).

Se discretizó la dirección del oleaje en rangos de 10°, la altura de ola en rangos de 0.50m y el periodo pico en rangos de 2s obteniéndose las tablas de distribución conjunta Hs –

Tp – Dir, cuyos datos se han utilizado para calcular la tasa anual de transporte potencial longitudinal por probabilidad de ocurrencia de dirección, altura y periodo de ola.

Se han realizado los cálculos usando las reconstrucciones de clima con dirección media y dirección pico, para una rugosidad de 0.10 y 0.05 y para dos tamaños medios de grava de 20 y 40mm.

A continuación, se presentan tablas resúmenes con las tasas de transporte obtenidas por ambas fórmulas en cada punto de control. De esta manera podremos interpretar de manera cualitativa el comportamiento sedimentológico de este tramo.

Figura 74

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dm y rugosidad de 0.10 para reconstruir la serie de oleaje en aguas p) para guijarros con D50=40mm

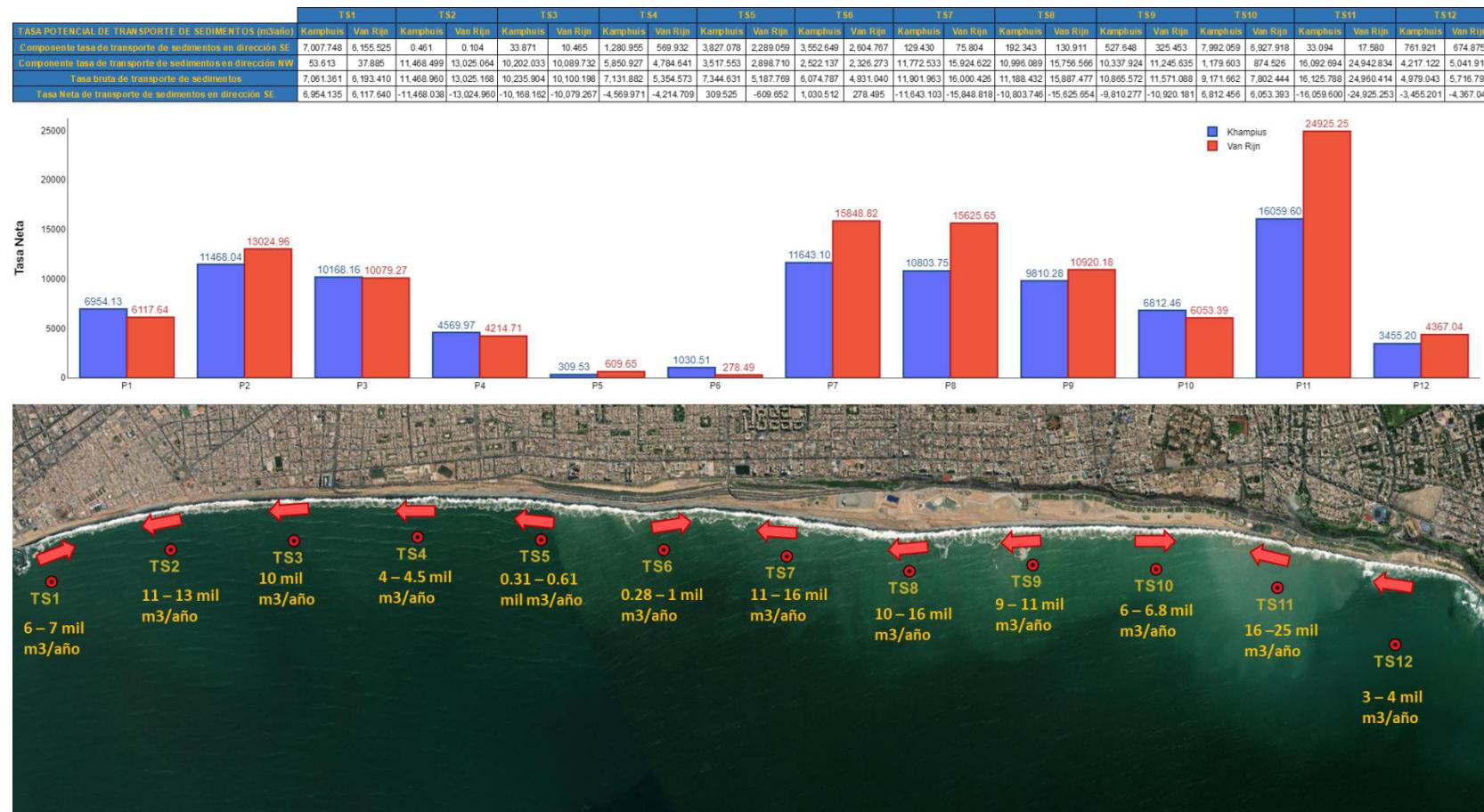


Figura 75

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la D_m y rugosidad de 0.10 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con $D_{50}=20\text{mm}$

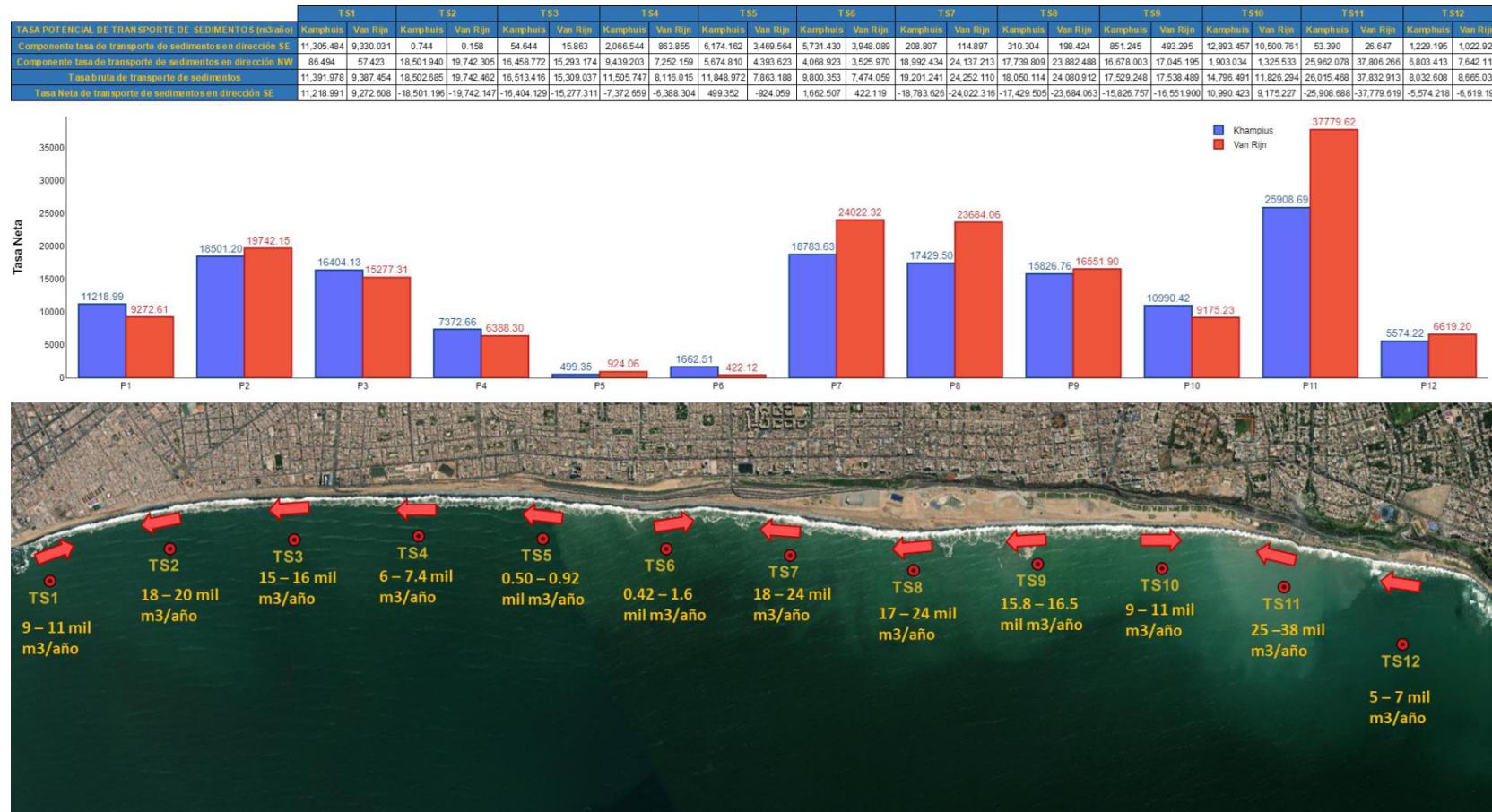


Figura 76

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.10 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con D50=40mm

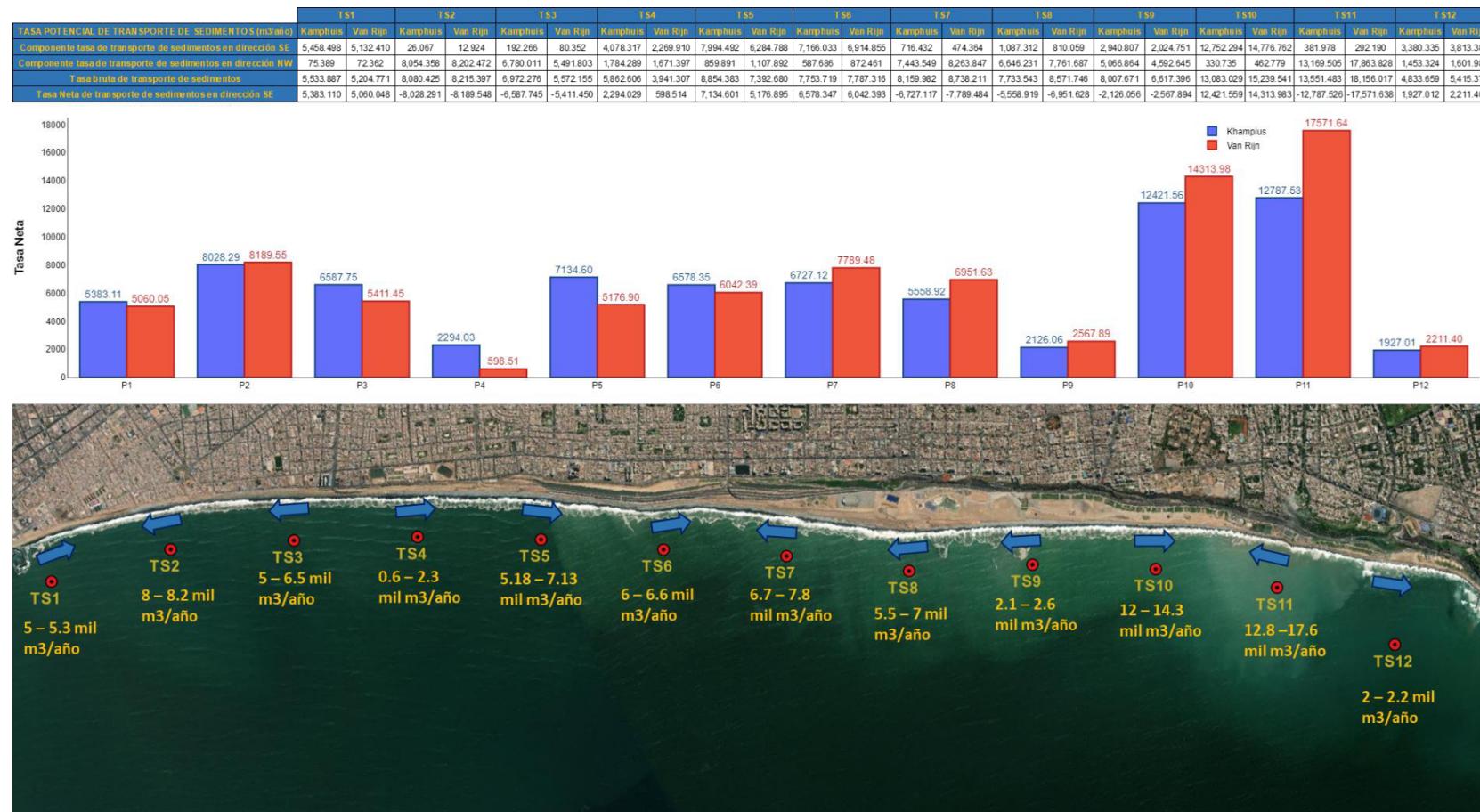


Figura 77

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.10 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con D50=20mm

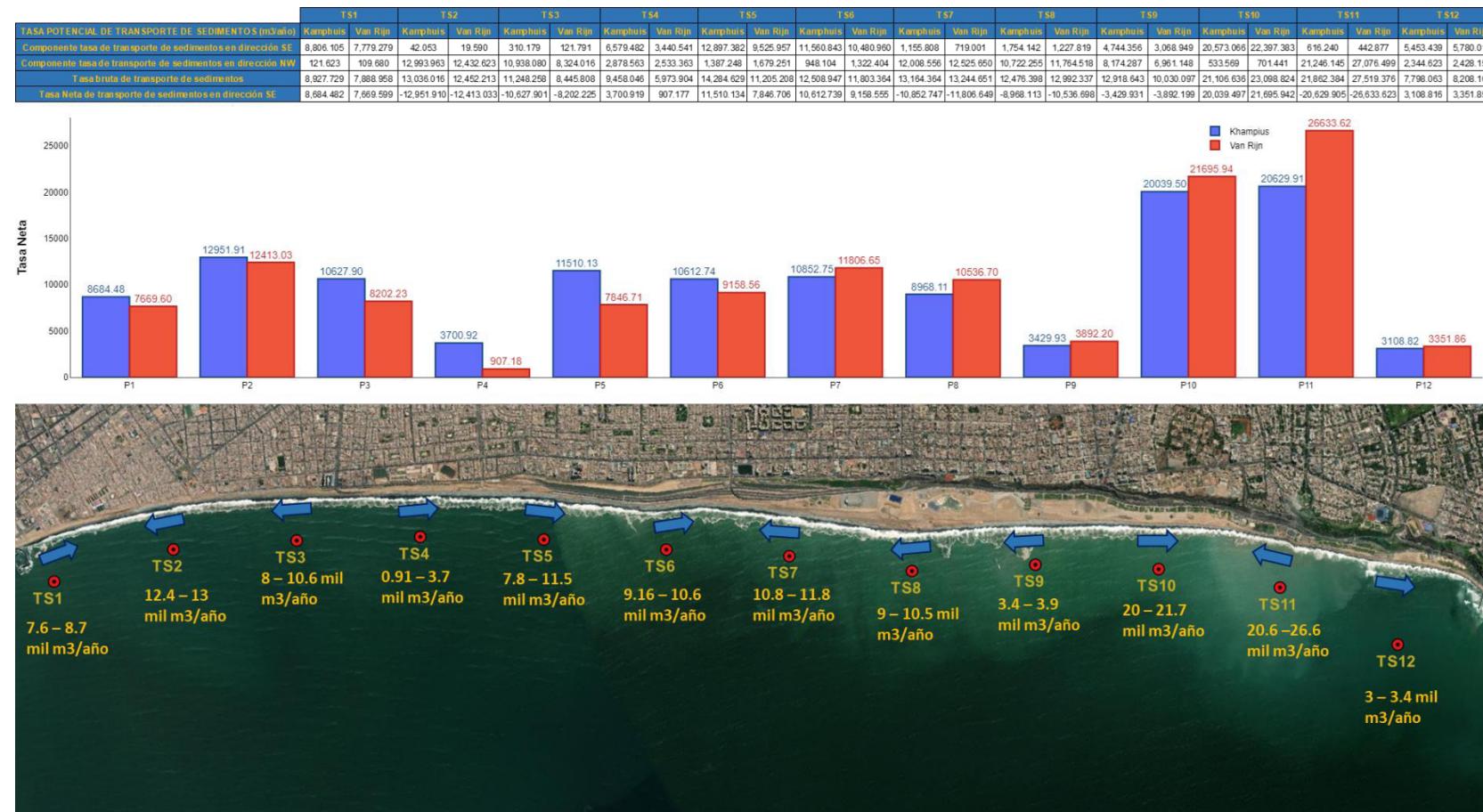


Figura 78

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dm y rugosidad de 0.05 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con D50=40mm

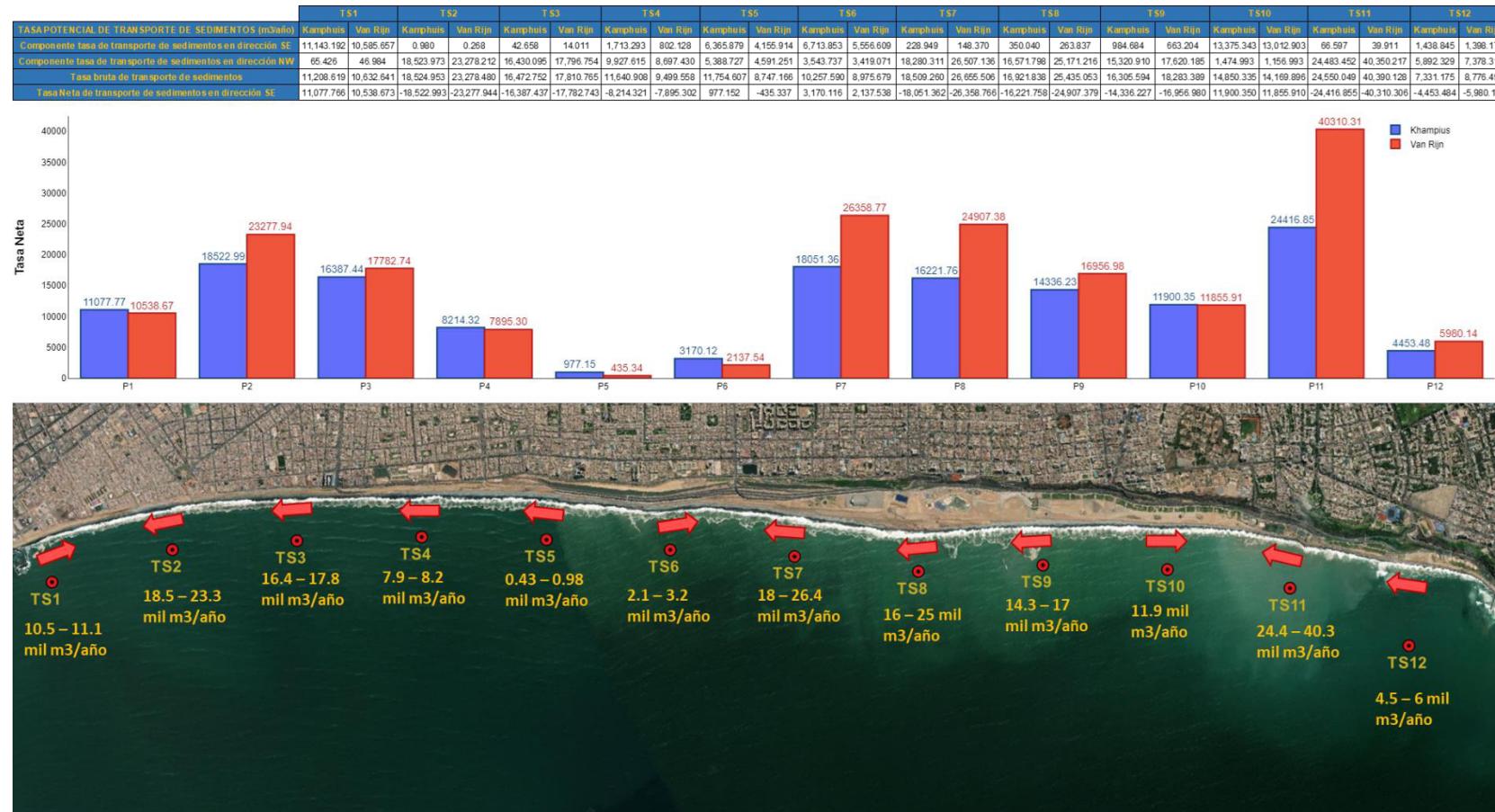


Figura 79

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la D_m y rugosidad de 0.05 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con $D_{50}=20\text{mm}$

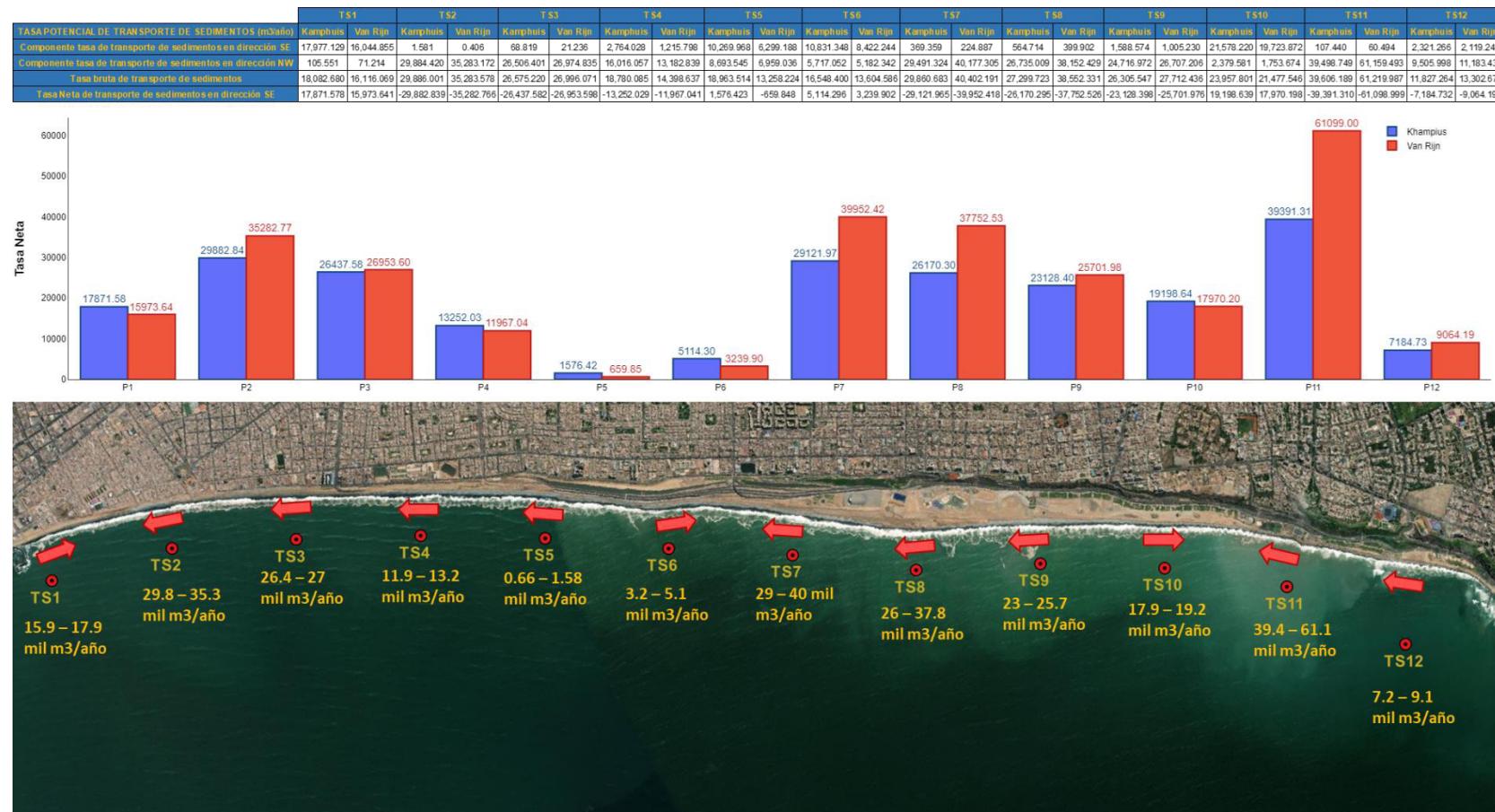


Figura 80

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.05 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con D50=40mm

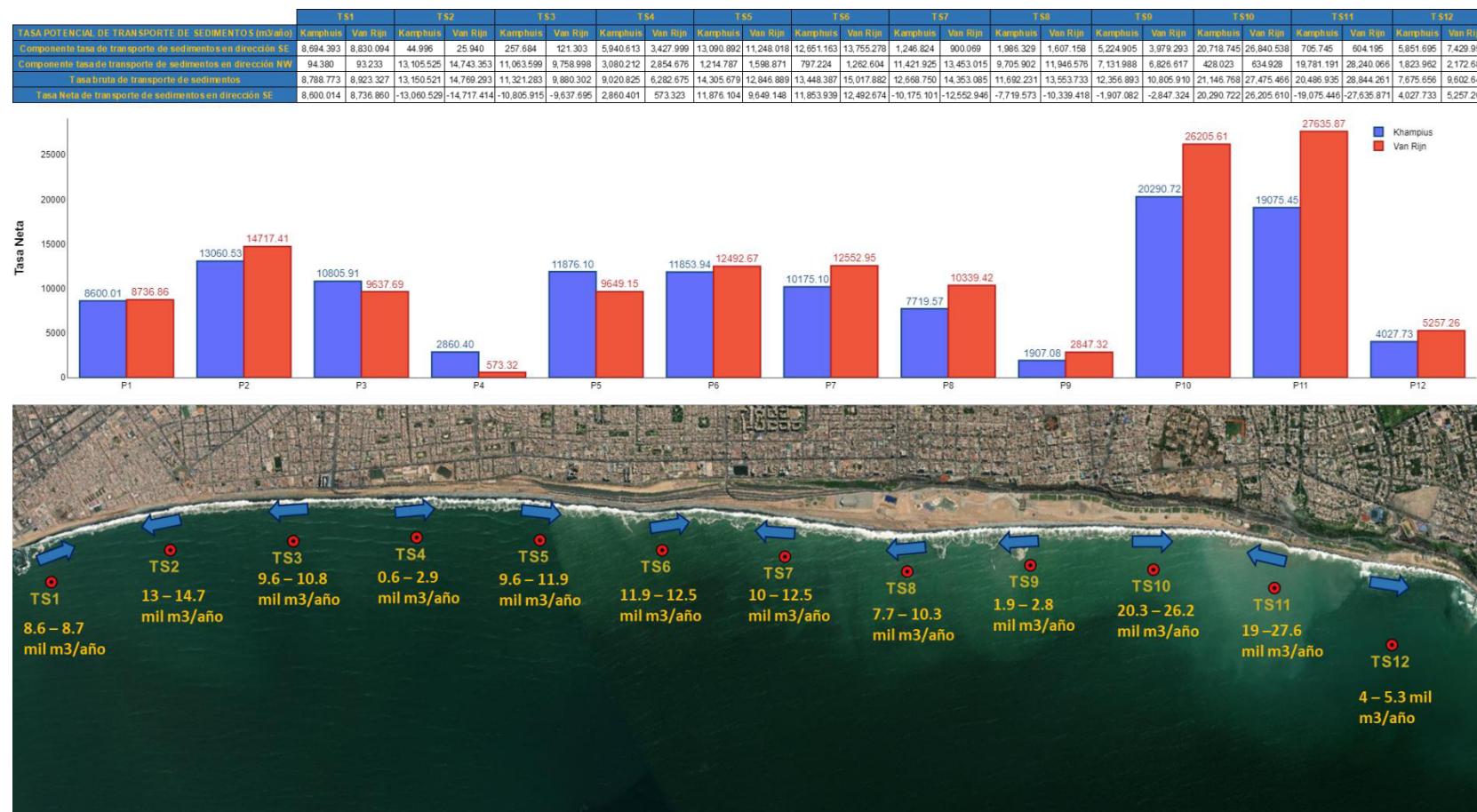
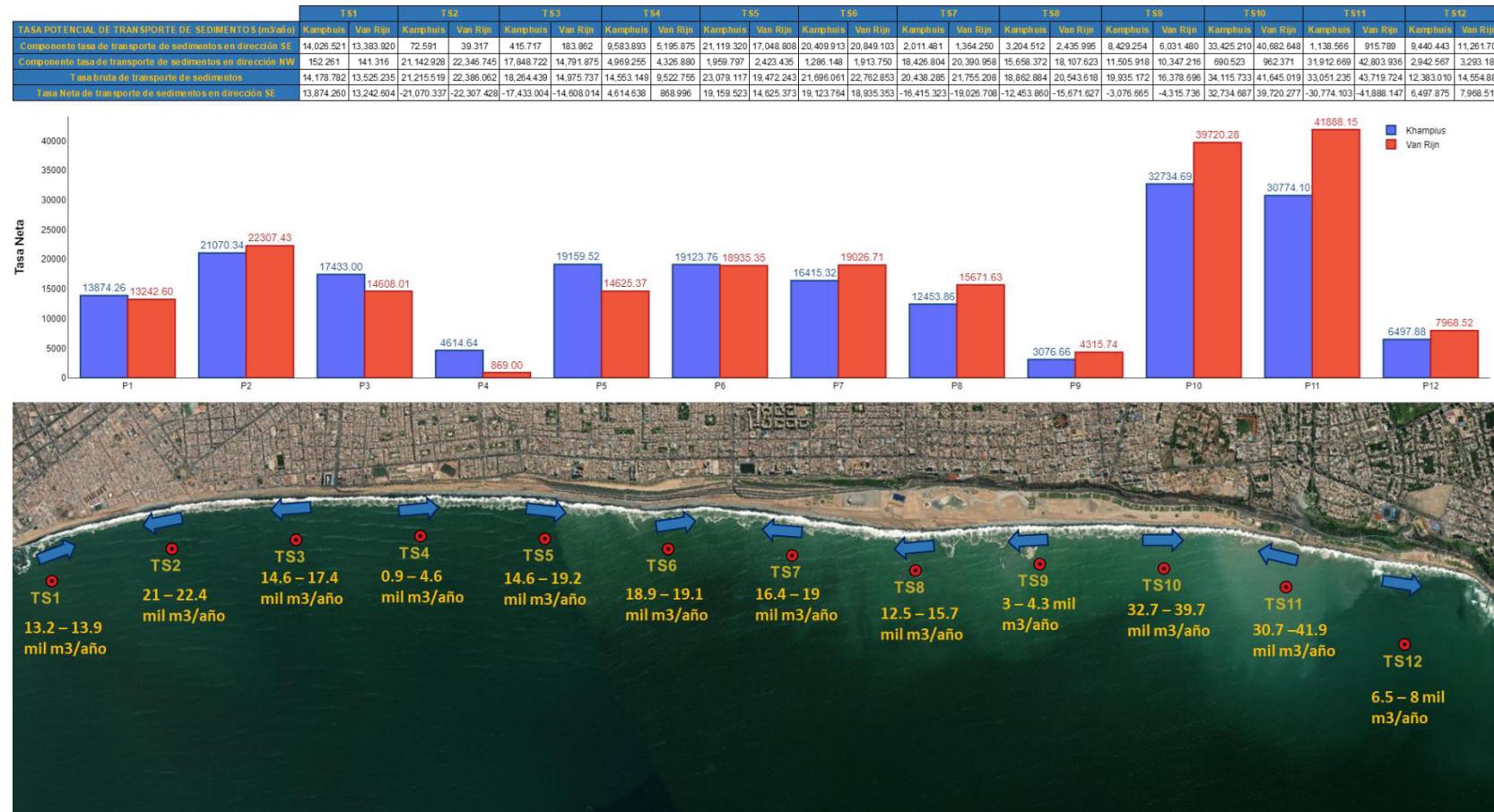


Figura 81

Tasa potencial de transporte de sedimentos en cada punto control calculada con la fórmula de Kamphuis modificada y fórmula de Van Rijn (usando la Dp y rugosidad de 0.05 para la reconstrucción del clima de olas) para guijarros con D50=20mm



De las figuras 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 y 81 presentadas, se puede comentar lo siguiente:

- En el tramo Magdalena – San Miguel donde ocurre los rellenos, tanto como para la reconstrucción del clima con dirección media o pico se puede visualizar que el transporte se moviliza hacia la zona del callao.
- Para la reconstrucción del clima con dirección media, en la zona donde se forma el pequeño hemitombolo o seno sedimentario producto de las islas horadadas, podemos visualizar que a su lado derecho el transporte se dirige hacia la zona de relleno y a su lado izquierdo el transporte se dirige a la zona del callao, el transporte en ambos lados es reducido debido a la protección que brinda las islas horadadas.
- En los puntos extremos del tramo de estudio el transporte es reducido debido a que el oleaje en estas zonas es menos energético tal como habíamos comentado en el apartado de modelamiento de propagación de oleaje.
- Realizando una comparación de lo calculado y las ortofotos presentadas (2004 – 2022) podemos visualizar que la dirección del transporte mantiene el mismo comportamiento.
- De los cálculos realizados con las fórmulas de Van Rijn y Kamphuis modificada (2013), podemos comentar que los resultados mantienen bastante semejanza en sus valores.

IV CONCLUSIONES

- Se ha analizado y descrito el funcionamiento de la unidad fisiográfica costera de la bahía de Miraflores que ha sido modificada durante estos últimos 20 años.
- En la actualidad la bahía de Miraflores se comporta como una unidad fisiográfica cerrada entre Chorrillos y la Escuela Naval de la Punta. Esto se debe al desarrollo urbano y portuario en este último siglo y a la regulación de los cauces fluviales.
- Si bien no hay ingresos ni salidas de sedimentos tipo arena provenientes de cauces fluviales, durante los últimos 20 años se han producido rellenos masivos en la zona de San Miguel – Magdalena generando un aporte de sedimentos del tipo grava que se distribuye a lo largo del tramo de estudio, por lo que el tramo Magdalena – Callao seguirá sedimentándose hasta encontrar su estado de equilibrio.
- Para entender el comportamiento del oleaje en la bahía de Miraflores se realizó un modelamiento de propagación de oleaje para una condición media, máxima anual y extremal (TR=100 años), donde se puede concluir que los oleajes con dirección S, SSW Y SW provenientes de aguas profundas son los que están presentes casi toda la época del año y además penetran con mayor energía en la bahía. Los oleajes provenientes de dirección O - NO penetran con menos intensidad debido al abrigo de la isla San Lorenzo y la isla El Frontón.
- En la zona donde se ubica las islas horadadas, el oleaje se transforma generando un comportamiento diferente por su lado Norte y Sur.
- De los puntos de reconstrucción, entre los puntos TS5 y TS6 se ha formado un pequeño hemitombolo por la presencia de las islas horadadas, este seno sedimentario se comporta como una barrera parcial al transporte de sedimentos.
- De la información de tipo de sedimentos en la zona y ortofotos históricas podemos comentar que el borde costero del tramo de estudio se encuentra dominado por sedimentos de tipo guijarro y canto rodado, debido a la erosión que sufrió las terrazas

aluviales y por los rellenos masivos en el distrito de San Miguel y Magdalena. Además de la información de sedimento realizado por la dirección de hidrografía y las muestras realizadas por las empresas GEOMYTSA e INMAR, el perfil de la playa del tramo de estudio está compuesto por gravas que se extiende desde la orilla hasta la profundidad de 2 a 5 m aproximadamente y a continuación un tramo de arenas finas.

- De los cálculos de la tasa de transporte longitudinal en los 12 puntos establecidos, podemos observar que las fórmulas de Van Rijn y Kamphuis modificada (2013) nos brindan valores similares y mantiene un comportamiento similar a lo analizado en las ortofotos históricas.
- Al no contar con una batimetría de detalle entre el borde costero y la profundidad de 10 metros no se pudo identificar el punto exacto de la zona de rompiente y es por ello que se ubicaron los puntos de reconstrucción a una profundidad lo más cercano a la zona de rotura, dicho esto, si en futuros estudios los puntos de reconstrucción se ubican más cerca a costa se debe tener en cuenta que sus parámetros de oleaje más representativos (altura de ola, periodo pico y dirección del oleaje) serán distintos y ello se traduciría en una variación relevante de la tasa anual y la dirección del transporte potencial longitudinal de sedimentos en el tramo de estudio.

V RECOMENDACIONES

Con el fin de poder obtener tasas anuales de transporte potencial longitudinal de sedimentos más precisos en el tramo de estudio se recomienda lo siguiente:

- Batimetría y topografía de detalle que abarque desde la línea de más alta marea, hasta los 10 metros de profundidad (principalmente en la zona de rompiente) para ser utilizado en el modelo de terreno y se pueda identificar la zona de rompiente de las salidas del modelo de olas.
- Mediciones de parámetros de oleaje in situ durante distintas épocas del año (de preferencia un año completo y durante eventos extremos) para poder validar con mayor precisión el modelo de propagación de oleaje.
- Información de campañas de muestras de sedimentos de fondo a lo largo de diversos perfiles transversales para poder identificar hasta qué profundidad abarca las zonas de grava y cuando empieza la zona compuesta por arena.
- Utilizar modelos de propagación de oleaje que tengan en cuenta el fenómeno de reflexión.
- Utilizar espectros de oleaje completos en aguas profundas para que el modelo de propagación de oleaje pueda tener en cuenta la multimodalidad del oleaje.
- Contar con campañas de topografía y batimetría periódicas (de preferencia después de la época de verano e invierno) para determinar el volumen sedimentado y socavado y la variación de la línea de costa, siendo esta información importante para poder validar las tasas de transporte calculadas mediante fórmulas empíricas y también para validar y calibrar modelos numéricos de transporte de sedimentos en caso se realicen.

VI BIBLIOGRAFÍA

- CEM, 2002. Coastal Engineering Manual. In Coastal Engineering Manual. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers
- G.I.O.C, 2002. Manual de usuario del SMC. (Sistema de Modelado Costero versión 3.0), España: Universidad de Cantabria.
- G.I.O.C (UC), 2000. Manual de referencia Oluca-MC 3.0. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C): Universidad de Cantabria (U.C).
- G.I.O.C., 2000. Documento de referencia. Dinámicas. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Universidad de Cantabria., p.27.
- Holthuijsen, L.J., 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters., New York: Cambridge University Press.
- Manual Mike 21 Spectral Waves FM. Recuperado de:
https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/MIKE21SW.pdf
- Simple assessments of Coastal Problems and Design of Adaptation and Disaster Risk Management Solutions. Recuperado de:
<http://www.simplecoast.com/>
- Olas en aguas someras. Recuperado de:
https://www.meted.ucar.edu/education_training/lesson/1352
- Judith Bosboom and Marcel J.F. Stive. Coastal Dynamics