



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – INGENIERÍA DE COSTAS Y RÍOS

ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA LÍNEA DE COSTA
GENERADO POR EL PUERTO DE ABRIGO DE SISAL
UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ÁLVARO JOSÉ QUIJANO MANZANILLA

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
ERNESTO TONATIUH MENDOZA PONCE, UNIVERSIDAD DE ROUEN
PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

SISAL, HUNUCMÁ, YUCATÁN, ABRIL DE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Medellín Mayoral Gabriela

Secretario: Dr. Rioja Nieto Rodolfo

1 er. Vocal: Dr. Salles Afonso De Almeida Paulo

2 do. Vocal: Dr. Mendoza Ponce Ernesto T.

3 er. Vocal: Dr. Molino Minero Re Erik

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Sisal, Yucatán, México

TUTORES DE TESIS:

DR. ERNESTO TONATIUH MENDOZA PONCE

FIRMA

TUTOR DE TESIS:

DR. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA

FIRMA

Dedicatoria

A Álvaro y Cristell por ser los grandes motores de mi vida y para siempre mirar hacia adelante.

Agradecimientos

Al Dr. Tonatiuh Mendoza por su infinita paciencia y consejos durante todo el tiempo que necesite para desarrollar este trabajo.

Al Dr. Paulo Salles y al LIPC Sisal por hacer posible la oportunidad de incorporarme al programa de posgrado y llevar a cabo este sueño.

A todo el equipo de Axis ingeniería por el apoyo brindado durante el tiempo que duro la maestría. Así como todos mis amigos y compañeros del departamento de ingeniería que estuvieron para apoyarme.

A Enrique Alvarez por ser quien me inculco la pasión por el fascinantemente mundo de la ingeniería de costas.

A mi esposa Cristell y a mi hijo Álvaro por esperarme pacientemente en casa mientras yo me “divertía” haciendo la maestría. A mis hijas Fernanda e Isis que también me apoyaron a la distancia.

Sin duda alguna a mis padres, mis hermanos y toda mi familia que siempre estuvieron y están al pendiente de una u otra manera y que se enorgullecen, disfrutan y comparten mis logros.

A todos mis amigos y compañeros del LIPC; Luis, Ivette, Fernando, Clemente, Paladio, Daniel, Macario, Karen, Oswaldo, Rodrigo y Gonzalo por el gran equipo y grupo que formamos y que sin duda alguna su ayuda fue de gran apoyo durante toda la maestría.

Y sin duda alguna a Dios y a la vida por ponerme en el lugar correcto a la hora correcta para que este sueño se llevara a cabo.

Índice

I. Resumen	IX
1 Introducción	1
1.1 Fotogrametría digital y uso en vehículos aéreos no tripulados	5
1.2 Objetivo	7
2 Zona de estudio	8
2.1 Descripción de la zona	8
2.2 Clima marítimo	9
3 Metodología	12
3.1 Trabajo de campo	13
3.1.1 Rutas de vuelo	13
3.1.2 Vuelos de dron	14
3.1.3 Puntos de control	15
3.2 Post Proceso	15
3.2.1 Proceso fotogramétrico	16
3.2.2 Validación de los DEM	17
3.2.3 Digitalización de líneas de costa	19
3.3 Análisis de cambio de la costa	22
3.3.1 Movimiento neto de la costa “NSM”	22
3.3.2 Tasa de regresión lineal “LRR”	22
3.4 Caracterización del oleaje y correlación con el cambio de la línea de costa ..	23
3.4.1 Caracterización de eventos	23
4 Resultados	25
4.1 Trabajos de campo	25
4.1.1 Rutas de Vuelo	25
4.1.2 Levantamientos	25
4.1.3 Georreferenciación	26
4.2 Post-proceso	26
4.2.1 Proceso fotogramétrico	26
4.2.2 Validación de los DEM	27
4.2.3 Digitalización de línea de costa	34

4.3	Análisis de cambio en la costa	35
4.3.1	Movimiento Neto de la Costa (NSM)	36
4.3.2	Tasa de regresión lineal (LRR)	36
4.4	Caracterización del oleaje y correlación entre el oleaje y los cambios en la costa	40
4.4.1	Caracterización de eventos	40
4.4.2	Cambios en la costa debido a los eventos	41
5	Discusión	46
6	Conclusiones	50
7	Referencias	52
8	Anexos	56
8.1	DEM y ortofotos.....	56
8.2	Anexo 2 Reportes de calidad Pix4D	59

Índice de figuras

Figura 1: Mapa del Sistema Portuario en México. (secretaria de Comunicaciones y Transportes 2016).....	3
Figura 2: Forma de operación del "structure from motion" (Westoby et al. 2012)	6
Figura 3: Localización de la zona de estudio y ADCP	8
Figura 4: Izq. Plano de delimitación del recinto portuario, Der. Zona de vuelos de dron, SCT 2009, Google Earth.....	9
Figura 5: Rosa de vientos (WRFS), Figueroa-Espinoza, B. et al. (2014)	10
Figura 6: Metodología.....	13
Figura 7: Phantom 4, DJI 2017	14
Figura 8: Distribución de puntos de control en área de estudio	15
Figura 9: Flujo de trabajo Pix4D.....	16
Figura 10: factores importantes para el cálculo del GSD, Pix4D	17
Figura 11: Esquema de recorrido para levantamiento de perfiles de playa con GPS	19
Figura 12: Ejemplo de NSM entre dos líneas de costa, manual DSAS	22
Figura 13: Ejemplo del cálculo de LRR entre un grupo de líneas de costa, manual DSAS	23
Figura 14: Rutas prediseñadas para vuelos, Pix4D capture	25
Figura 15: Punto de control semi-fijo (izquierda), Punto de control móvil (Derecha)	26
Figura 16: DEM (parte superior) y ortofoto (parte inferior) del mes de agosto de 2017....	27
Figura 17: Extracto del informe de calidad del mes de agosto generado por el software de procesamiento.....	27
Figura 18: Ubicación de perfiles dentro de la zona de estudio, modelo digital de elevación del mes de agosto.....	28
Figura 19: Correlación de los datos obtenidos para el perfil uno, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.....	29
Figura 20: comparativa grafica perfil 1, GPS y dron, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM.....	30
Figura 21: Correlación de los datos obtenidos para el perfil dos, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.....	30
Figura 22: comparativa grafica perfil dos, GPS y DEM, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM.....	31
Figura 23: Correlación de los datos obtenidos para el perfil tres, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.....	31
Figura 24: comparativa grafica perfil tres, GPS y DEM, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM.....	32
Figura 25: Correlación de los datos obtenidos para el perfil cuatro, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.....	32

Figura 26: comparativa grafica perfil cuatro, GPS y DEM, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM.....	33
Figura 27: Evaluación GPS vs DEM, todos los perfiles	33
Figura 28: extracto de curvas de nivel en la zona de estudio a cada 0.80 m.....	34
Figura 29: Resultados de la detección de bordes con algoritmo de Canny.....	34
Figura 30: Escarpe del mes de agosto en la zona de estudio, a la izquierda el escarpe en la zona de estudio y a la derecha la línea del escarpe en planta obtenida a partir del DEM	35
Figura 31: Escarpes en la zona de estudio, las líneas en colores representan los escarpes obtenidos en cada campaña de campo.....	35
Figura 32: Línea base (en rojo) y transectos a cada 20 m (en negro).....	36
Figura 33: Resultados del Movimiento Neto de la Costa (NSM), en la parte superior valores obtenidos para los transectos del 1 al 25, parte media de los transectos 25 al 29 y en la parte inferior transectos del 49 al 73.	38
Figura 34: Resultados de la tasa de regresión lineal (LRR), en la parte superior valores obtenidos para los transectos del 1 al 25, parte media de los transectos 25 al 29 y en la parte inferior transectos del 49 al 73.	39
Figura 35: Serie temporal de altura y dirección de oleaje durante el periodo de estudio y vuelos de dron, la línea en azul representa la serie de oleaje y las alturas de este, los puntos en rojo la dirección del oleaje y las líneas en café las fechas en que se realizaron los vuelos de dron.	40
Figura 36: Transectos para evaluación de cambios en la costa por los eventos de oleaje, las líneas rojas representan la ubicación y numero de los perfiles elegidos.	41
Figura 37: Cambio en la posición del escarpe a lo largo del tiempo, en la parte superior se observa la serie de oleaje, así como su altura y su dirección, en la parte inferior los cambios en el escarpe debido a los diferentes eventos que se presentaron durante el tiempo de estudio.	44
Figura 38: Cambios en la línea de costa en la zona de estudio durante el tiempo de estudio, en la parte superior se observa el cambio en la tasa de regresión lineal en la zona de estudio y en la parte inferior el cambio de la tasa de regresión lineal en cada uno de los transectos.	45
Figura 39: DEM y ortofoto del mes de enero de 2017.....	56
Figura 40: DEM y ortofoto del mes de enero de 2017.....	56
Figura 41: DEM y ortofoto del mes de marzo de 2017.....	57
Figura 42: DEM y ortofoto del mes de abril 2017	57
Figura 43: DEM y ortofoto del mes de mayo 2017	57
Figura 44: DEM y ortofoto del mes de junio 2017	58
Figura 45: DEM y ortofoto del mes de julio 2017	58
Figura 46: DEM y ortofoto del mes de agosto 2017	58
Figura 47: DEM y ortofoto del mes de diciembre de 2017.....	59
Figura 48: Reporte de calidad del mes de diciembre de 2016	59
Figura 49: Reporte de calidad del mes de enero de 2017.....	60
Figura 50: Reporte de calidad del mes de marzo de 2017	60
Figura 51: Reporte de calidad del mes de abril de 2017	61

Figura 52: Reporte de calidad del mes de mayo de 2017.....	61
Figura 53: Reporte de calidad del mes de junio de 2017	62
Figura 54: Reporte de calidad del mes de julio de 2017	62
Figura 55: Reporte de calidad del mes de agosto de 2017	63
Figura 56: Reporte de calidad del mes de noviembre de 2017	63
Figura 57: Reporte de calidad del mes de noviembre de 2017	64

Índice de tablas

Tabla 1: Especificaciones técnicas Phantom 4.....	14
Tabla 2: Fechas de vuelos y numero de fotos obtenidas en cada vuelo	25
Tabla 3: Resumen de resultados de informes de calidad.....	28
Tabla 4: Perfiles de playa	29
Tabla 5: Resumen de resultados del Movimiento Neto de la Costa (NSM)	37
Tabla 6: Resumen de resultados de Tasa de Regresión Lineal (LRR)	37

I. Resumen

Este trabajo presenta una evaluación de la línea de costa durante un año en la zona oeste del puerto de abrigo de Sisal, Yucatán, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados y el uso de técnicas de fotogrametría digital y análisis geoespacial. Se cuantificó el movimiento neto de la costa y la tasa cambio. Para el primer parámetro se obtuvo que el ancho de playa disminuyó en promedio cuatro metros, con un valor máximo de hasta 6.71 metros de erosión. Para la tasa de cambio se obtuvo una erosión generalizada en la zona con un valor promedio de -4.22 m/año de erosión y un máximo de -6.24 m/año. Se observó que la zona más afectada son los primeros 600 metros a partir de la escollera oeste del puerto de abrigo. Se observó que la presencia de las estructuras que conforman el puerto de abrigo tiene una influencia notoria sobre el comportamiento de la línea de costa en la zona de estudio

1 Introducción.

Históricamente, los humanos han preferido establecer sus residencias cerca de la costa debido a los muchos servicios que brinda el área (Syvitski et al. 2005). Actualmente, aproximadamente 44% de la población mundial reside a menos de 150 km de la costa (Syvitski et al. 2005). Según las estadísticas y las proyecciones, se espera que este número siga incrementándose hasta alcanzar cifras que van desde 1.8 a 5.2 mil millones de habitantes migrando hacia las costas para la década del año 2080 (Nicholls et al. 2007). Leatherman et al. (2003) describe como la migración de la población mundial hacia la costa se produce al mismo tiempo que un conjunto de problemáticas como el aumento del nivel medio del mar, la pérdida de tierras y consecuentemente el debilitamiento de la base económica de las comunidades costeras.

La costa es un área altamente dinámica con movimiento constante de sedimentos, que crea nuevas características morfológicas y cambia de posición de manera constante (Absalonsen y Dean, 2011). Sin embargo, esta región tiene una limitada capacidad para soportar las alteraciones antrópicas y los intensos procesos de producción, consumo e intercambio que en ella ocurren. Estos cambios suceden a distintas escalas espaciales y temporales, desde huracanes y ciclones cuyos efectos producen respuestas a corto plazo, hasta el paulatino aumento del nivel del mar por el calentamiento global o deslizamientos submarinos cuyos efectos se verán reflejados en un lapso mayor. Por lo tanto, la costa es un sistema de naturaleza altamente variable, dominada por procesos complejos generados por la interacción de fuerzas físicas locales y distantes que producen fenómenos periódicos y episódicos que afectan su estabilidad. Además, afectar esta estabilidad significaría desestimar la importancia ambiental de la costa que radica en la productividad y la diversidad que en ella se alberga, ya que producen el 90% de la industria pesquera a nivel mundial y el 80% de las 13,200 especies marinas conocidas son costeras (Belfiore et al. 2004). Además de proveer servicios ecológicos y sociales, la zona costera también es aprovechada en el sector económico para diversas actividades entre las que destacan la minería, actividades industriales, comerciales y de transporte marítimo, pesqueras, acuícolas, generación de energías y la explotación, producción y distribución de hidrocarburos de la industria petrolera.

Aunado a las causas de efectos climatológicos, otros factores que influyen la erosión costera incluyen inestabilidad y subsidencia tectónica y el cambio climático que trae consigo el aumento del nivel del mar como motor subyacente, lo que explica la erosión costera casi omnipresente (Jonah et al. 2016). A pesar de que se pueden enlistar más causas de efectos naturales al problema mundial de la erosión costera, son las numerosas actividades humanas con las enormes inversiones en infraestructura costera que han realizado a lo largo de la mayoría de las secciones de la costa del mundo (Jonah et al. 2016) quienes han afectado en gran medida la zona costera. Estas grandes inversiones van de la mano con el aumento de los volúmenes de comercio marítimo como causa de la globalización y la internacionalización de las economías (Jiang et al. 2015). En países asiáticos como China e India, la cantidad de exportaciones ha aumentado de manera significativa, en consecuencia, los puertos industriales han aumentado su tamaño para hacer frente a sus capacidades límite y volúmenes de carga (Lu et al. 2018) y esta misma tendencia se observa en las costas alrededor del mundo. El desarrollo de infraestructura portuaria implica la construcción de estructuras como espigones, diques, rompeolas, embarcaderos, etc., las cuales dan como resultado que la línea de costa y la morfología costera sufran modificaciones (Elmoustapha et al. 2007). Además de esto, también tiene un impacto importante en los parámetros de la dinámica costera como son el oleaje, las corrientes, etc., (Mohamed y Elsayed, 2007). Estos cambios se han estudiado utilizando modelos físicos y numéricos (Özölçer et al. 2006).

La modificación de los parámetros morfológicos y dinámicos debido a la construcción de estructuras a lo largo de la costa ya sea para el desarrollo de puertos o para tratar de mitigar la erosión, traen como resultado modificaciones significativas en la línea de costa y la tendencia en el patrón erosión/acreción (Mohanty et al. 2015). Por lo general este patrón suele ser de acumulación (acreción) del lado corrientes arriba y de retroceso (erosión) en el lado corrientes abajo.

En un estudio realizado por Mohanty et al. (2015) en los tres puertos principales de la costa de Odisha, India (Gopalpur Port, Paradip Port y Dhamara Port), se observaron retrocesos en la línea de costa después de fases de construcción, obras de ampliación o modernización de los puertos. Otro estudio en el ámbito local realizado por el Laboratorio Nacional De

Resiliencia Costera (LANRESC, 2018) menciona que se presenta retroceso en la línea de costa al oeste de los puertos de Celestún, San Crisanto, Chuburná, Yucalpetén y Telchac.

Para conocer y cuantificar las afectaciones que pueden causar las estructuras que conforman los puertos de abrigo, una de las herramientas mayormente utilizadas son los programas de monitoreo costero, los cuales requieren la recopilación de datos sucesivos a partir de los cuales se puede detectar y analizar los cambios de manera efectiva. Los métodos tradicionales de recolección de datos pueden incluir la medición de la elevación del terreno a lo largo de líneas perpendiculares a la línea de costa (perfiles de playa) para la reconstrucción espacial de la zona costera, lo cual a su vez se puede hacer con (a) estatal, cinta y nivel, (b) nivel y estación total, (c) GPS, (d) escaneo láser terrestre para una cobertura completa de la playa, etc. Cada uno de estos métodos de recopilación de datos proporciona la capacidad de delinear las características de los indicadores costeros para monitorear la erosión con diversos grados de precisión y limitaciones. Las mediciones de perfiles de playa son fácilmente repetibles y establecidas, pero están limitadas por la cantidad, el tipo de datos resultantes y su alto costo (Gulyaev, 2004). Los levantamientos con GPS son rápidos y precisos pero limitados en el número de puntos medibles y la cobertura puede ser limitada por la accesibilidad debido al terreno (Clark, 2017).

Actualmente en México operan un total de 26 Administraciones Portuarias Integrales (API), las cuales administran y operan 117 puertos, 58 de ellos ubicados en la vertiente del Pacífico y 59 en las costas del Golfo de México y mar Caribe (Figura 1) (SCT 2016).



Figura 1: Mapa del Sistema Portuario en México. (secretaria de Comunicaciones y Transportes 2016)

De acuerdo con el Programa Nacional de Infraestructuras 2014-2018, debido al aumento del comercio internacional, los puertos mexicanos más importantes están operando al límite de su capacidad. La congestión es más notable en las terminales de contenedores, ya que ésta es la modalidad de transporte que ha registrado el mayor aumento. Por lo tanto, el Programa Nacional de Infraestructuras establecía varios proyectos de inversión para ampliar la capacidad de los puertos mexicanos hasta 2018.

En el ámbito regional de la Península de Yucatán, las actividades portuarias empiezan a tener auge durante la última parte del siglo XIX y la primera parte del siglo XX en poblaciones costeras como Champotón, Campeche, Celestún, Sisal, Progreso, El Cuyo y Chetumal, cuyas actividades consistían principalmente para exportar productos naturales producidos en el interior y para las actividades pesqueras (Herrera-Silveira et al. 2002). A partir de 1900 el puerto de Progreso inicia un proceso de urbanización con la construcción de casas de veraneo frente a la playa y sobre la primera duna costera. Para el año 1947 se termina la construcción de un muelle de 2 km de largo que llegaba a la isobata de los 5.5 m de profundidad. En la década de 1970 se construyeron los puertos de abrigo de Dzilam de Bravo, Telchac Puerto, El Cuyo y Celestún, todos ellos con grandes escolleras y en la década de 1980 se construye el refugio pesquero de Sisal (Barrera Ceballos 2001).

Franklin et al. (2021) realizó un estudio del impacto en la línea de costa generado por los puertos de abrigo en la costa norte del estado de Yucatán en México, utilizando una combinación de metodologías para la obtención de datos como: imágenes satelitales históricas, vuelos de dron y campañas de levantamiento de perfiles de playa con equipo GPS diferencial para obtener la posición de la línea de costa y con ello cuantificar los cambios que se han presentado. Los puertos seleccionados para su estudio fueron los de Sisal, Chuburná, Yucalpetén, Telchac, Chabihau, Dzilam de Bravo, San Felipe y El Cuyo. Este estudio incluyó temporalidades interanuales ya que se obtuvieron imágenes en épocas antes de la construcción de las estructuras que conforman los puertos y en el caso de Sisal, también se realizó un estudio a una mayor escala temporal, con campañas de vuelos de dron y levantamiento de perfiles de playa de manera quincenal para conocer los cambios estacionales que se presentan en la zona.

Aunado a esto, en el caso del puerto de Sisal, se tomaron datos durante la realización de intervenciones costeras, como la construcción de un rompeolas a base de reef balls y un sistema de by pass de arena que buscaban ayudar a revertir o mitigar el retroceso de la línea de costa que se presenta en la zona oeste de las estructuras que conforman en puerto de abrigo de sisal.

Los resultados obtenidos por Franklin et al. (2021) muestran que existe una clara tendencia a la acumulación de arena en el lado este de los puertos y a la erosión de las playas en el lado oeste y que los efectos promedio de las corrientes arriba y debajo de los puertos son de aproximadamente 1500 m y 2300 m, respectivamente en las escalas interanuales. Para el estudio interanual, los resultados mostraron que de lado corrientes abajo del puerto el ancho de la playa disminuyó de manera general en un promedio de -1.5 m y un máximo de -10.1 m con excepción de una porción en el centro de la zona de estudio.

1.1 Fotogrametría digital y uso en vehículos aéreos no tripulados

Durante la mayor parte del siglo XX, los principios de fotogrametría implementados a través de instrumentos estereoscópicos fueron el medio principal para la construcción de mapas topográficos (Birdseye 1940). Además, la fotogrametría se ha empleado directamente durante muchos años en las geociencias mediante la visualización estereoscópica y el análisis de pares de fotografías aéreas superpuestas. Actualmente las técnicas de fotogrametría digital para recopilar datos cartográficos de imágenes tomadas por cámaras digitales integradas en vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha aumentado significativamente (Watts et al. 2012). Aunado a esto, se han desarrollado algoritmos que conforman un gran avance en esta área. Uno de los algoritmos que representan el mayor avance de la fotogrametría digital es el “Structure from Motion” (SfM), que es una técnica fotogramétrica que surgió en la última década utilizada para derivar reconstrucciones tridimensionales de una serie de fotografías superpuestas o traslapadas. Desarrollado por primera vez en la década de los 90 dentro de la industria de la visión por computadora, la aparición de SfM se benefició de nuevos avances en la percepción del movimiento y algoritmos automatizados de coincidencia de patrones característicos. SfM es más adecuado para un conjunto de imágenes donde hay un alto grado de traslape de las imágenes en la región que se va a inspeccionar desde un gran número de

posiciones y orientaciones diferentes, para las cuales una plataforma de cámara móvil se relaciona con un objetivo estacionario (Figura 2)

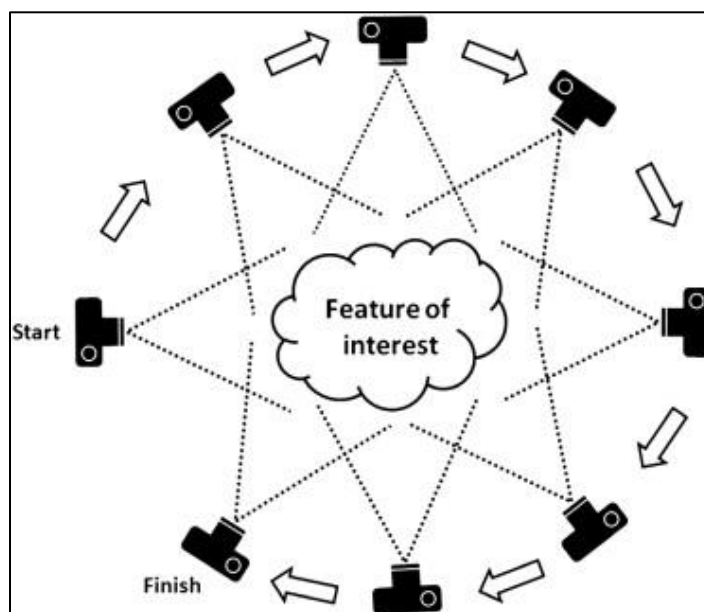


Figura 2: Forma de operación del "structure from motion" (Westoby et al. 2012)

Los desarrollos recientes en una nueva generación de algoritmos de coincidencia de imágenes junto con la miniaturización de sensores y la tecnología mejorada de las baterías han llevado a la aplicación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en una amplia gama de disciplinas (Harwin and Lucieer 2012). La adquisición de datos solo requiere un UAV pequeño y liviano con un sistema de control y una cámara digital estándar. En resumen, básicamente las aplicaciones de UAV se pueden clasificar como forestales y agricultura, arqueología y patrimonio cultural, estudios ambientales, monitoreo de tráfico y reconstrucción 3D (Remondino et al. 2012). Los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) se consideran una alternativa útil para la captura de datos, especialmente mientras apuntan a la aplicación de mapeo con alta resolución espacial y temporal, siendo también una alternativa de bajo costo a la fotogrametría aérea tripulada clásica (Colomina et al. 2008; Eisenbeiss 2011).

En las zonas costeras los UAV se han utilizado para mapear canales de ríos (Flener et al. 2013), generar modelos digital de superficie (DSM, por sus siglas en inglés) de un sistema de dunas de playa (Mancini et al. 2013) e investigar la formación y evolución de dunas de arena eólicas (Hugenholtz et al. 2012). En la actualidad el estudio de la geomorfología costera

se basa cada vez más en modelos digitales de superficie (DSM) de alta resolución espacial y precisión vertical para reconstruir el entorno tridimensional, para estudiar y simular de manera confiable la erosión costera, los fenómenos de inundación y evaluar la disponibilidad de sedimentos costeros (Mancini et al. 2013). Los UAV se han vuelto menos costosos y más fáciles de operar y brindan a los investigadores costeros una herramienta que supera muchas de las limitaciones de los métodos tradicionales de recolección de datos; en particular, los costos y las resoluciones espaciales y temporales requeridas para un monitoreo efectivo de la zona costera.

Existen en la literatura muchos trabajos donde se realizan monitoreos para la cuantificación del cambio de la morfología y la línea de costa utilizando técnicas convencionales a través de las herramientas como los GPS. Sin embargo, el uso de los vehículos aéreos no tripulados resulta en una alternativa que aún no ha sido explotada y desarrollada del todo, por eso en el desarrollo de este trabajo se combina el uso de estos en conjunto con técnicas de fotogrametría digital para evaluar y cuantificar el cambio en la línea de costa al poniente del puerto de abrigo de Sisal Yucatán.

1.2 Objetivo.

El objetivo general de este estudio es evaluar los efectos del puerto de abrigo de Sisal en la estabilidad de la playa, cuantificando la variación de la línea de costa durante un año, al poniente del puerto de abrigo de Sisal, a través del uso de vehículos aéreos no tripulados y técnicas de fotogrametría digital.

Los objetivos particulares son:

- a) Obtener la línea de costa a partir de los DEM para evaluar los cambios de la costa
- b) Validar los modelos digitales de elevación a través de una comparativa con datos obtenidos a través de un DGPS marca Leica conformado por el par de antenas GS14 y GS15 en su modalidad RTK (*Real Time Kinetics*).

2 Zona de estudio.

2.1 Descripción de la zona

Sisal es un puerto mexicano que se localiza en el litoral nor-poniente del estado de Yucatán, entre las coordenadas 21° 09' 55" latitud norte y 90° 01' 50" longitud oeste (Figura 3), en el municipio de Hunucmá a 63 km de la ciudad de Mérida (SCT 2009). Sisal tiene un clima cálido semi-seco con lluvias regulares en verano, de junio a octubre, y lluvias intermitentes durante el invierno debido a eventos como los frentes fríos o "Nortes". La temperatura media anual es de 25.8 °C, con registro de una temperatura máxima de 36 °C en mayo y una mínima de 19 °C en el mes de enero. La precipitación anual promedio es de 574 mm. A lo largo del año se pueden percibir dos estaciones: época de lluvias, que puede iniciar en mayo y terminar en octubre y la temporada de secas, de noviembre a abril (DIGAOHM. 2006).

Durante la segunda mitad del siglo XIX Sisal fue uno de los puertos de embarque más importantes del henequén, producto originario de la región y cuya fibra tuvo un gran auge comercial a nivel mundial (Santoyo Palacios 2017).

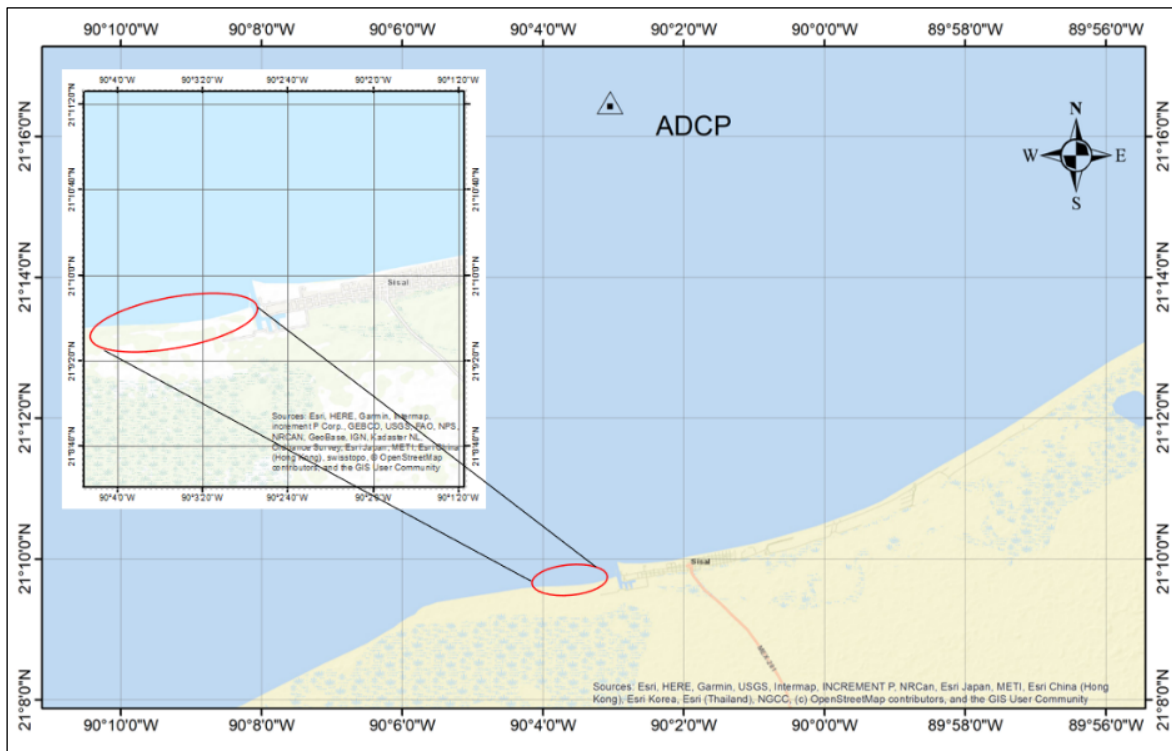


Figura 3: Localización de la zona de estudio y ADCP

En la actualidad es un puerto de abrigo cuya actividad principal es la pesca. Actividades de turismo se llevan a cabo en menor medida. El refugio pesquero tiene acceso protegido por escolleras: la escollera oriente tiene una longitud de 271 m; y la escollera poniente de 218 m. Las áreas de agua están integradas por un canal de navegación de 30 m de ancho y 3.6 m de profundidad, y una dársena interior de 25,000 metros cuadrados incluyendo tres zonas de fondeaderos (Figura 4 Izq.). Dispone de una longitud de atraque total de 490 m distribuidos en tres muelles, uno marginal y dos en peine. No presenta áreas de tierra asociadas formalmente a la actividad portuaria (SCT 2009). Al Oeste del puerto inicia la reserva estatal del Palmar y se extiende hasta colindar con el municipio de Celestún. Al Este se encuentra la Reserva Estatal Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán. Los vuelos de dron para efectos de este estudio se realizaron en extensión de 1.5 km (Figura 4 Der).



Figura 4: Izq. Plano de delimitación del recinto portuario, Der. Zona de vuelos de dron, SCT 2009, Google Earth

2.2 Clima marítimo

El clima marítimo de Sisal se define en general por presentar características similares al presente en toda la costa Norte de la Península de Yucatán, con vientos predominantes soplando del sureste, norte y noreste (brisas), mostrando año tras año eventos de frentes fríos, que comúnmente suelen llamarse en el ámbito local “Nortes”. Estos fenómenos naturales generan descensos de temperatura, lluvia y vientos fuertes provenientes del norte. Hay una estación lluviosa durante el verano, donde la velocidad promedio del viento disminuye considerablemente, y los vientos más energéticos provienen de tormentas tropicales y huracanes que no son muy frecuentes y generalmente pasan hacia la costa de los estados de

Veracruz y Tamaulipas, o hacia el norte hacia Texas, Florida o Louisiana en los Estados Unidos (Figueroa-Espinoza, B. et. al., 2014).

El oleaje en la costa norte de Yucatán se caracteriza por ser de baja energía ($H_s = 1$) con olas predominantes provenientes del sector NE, debido a las características las características que presenta la plataforma continental al ser muy ancha y somera (Appendini et al. 2012). La altura de ola significativa presenta la mayor energía durante los meses de invierno y primavera, en el primer caso se puede atribuir al oleaje que llega asociado a eventos del Norte, mientras que el segundo se relaciona con olas locales (cortas) generadas por eventos de brisa marina. Las condiciones de olas más suaves ocurren durante agosto-septiembre. Las olas del NE de son más frecuentes durante los meses de primavera a verano (Franklin et al. 2021).

En Sisal, los vientos llegan a ser hasta 50% más energéticos que las velocidades registradas a 50 km al sureste, esto debido a su ubicación en la península y siendo los vientos alisios los predominantes en la zona, que son provenientes de norestes y surestes. Por otra parte, se presentan vientos del NE asociados a las brisas marinas y vientos del SE o terrestres (Figura 5). Durante los eventos de brisas marinas las velocidades del viento pueden registrar valores mayores a los 10 m/s de dirección NE y durante los eventos de Nortes se han observado velocidades de hasta 15 m/s provenientes del NNW (Torres-Freyermuth et al. 2017)

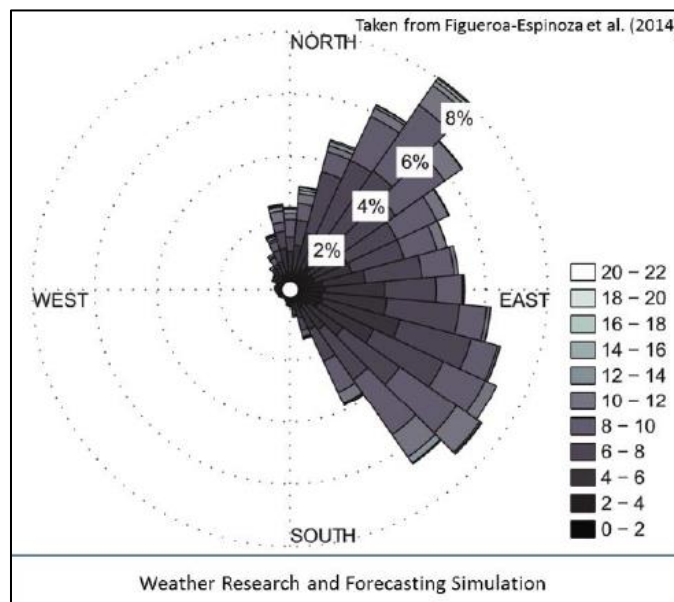


Figura 5: Rosa de vientos (WRFS), Figueroa-Espinoza, B. et al. (2014)

Las corrientes marinas que predominan en la zona de estudio tienen una dirección neta hacia al Oeste y paralelas a la costa con velocidades promediadas de 0.25 m/s y como máximas de 1 m/s. Los cálculos de transporte son consistentes con las estimaciones en la zona (-35,000 m³/año). Se determinó una tendencia dominante hacia el Oeste para el transporte potencial de sedimentos en prácticamente toda la costa, con valores entre -20,000 y -80,000 m³/año (Appendini et al. 2012)

3 Metodología

La metodología seguida para realizar este trabajo se ha dividido en cuatro secciones principales (Figura 6):

Sección 1. Trabajos de campo: En esta sección se llevaron a cabo las campañas de campo, que incluyeron las tareas para recabar toda la información en la zona de estudio para su posterior análisis. En específico se crearon las rutas para los vuelos de dron dentro de la zona de estudio, se realizaron los vuelos y se colocaron y levantaron los puntos de control para georreferenciar los resultados, los vuelos se realizaron a 40 metros de altura.

Sección 2. Post proceso: Una vez que se obtuvo toda la información necesaria en campo, el post proceso incluyó realizar el proceso fotogramétrico a través del software Pix4D Mapper, obteniendo como productos finales ortofotos y modelos digitales de elevación (DEM) de la zona de estudio. Con los DEM obtenidos, se realizó una validación de la calidad de la georreferenciación empleando dos procesos: primero a través de los reportes de calidad que el pix4D creó como parte del flujo de trabajo y además realizando una comparativa entre perfiles de playa medidos con GPS diferencial y los perfiles obtenidos con los DEM. Esta segunda comparativa se realizó únicamente en la campaña de campo de agosto. Finalmente, en el último apartado de la sección de post-proceso se realizó la digitalización de la línea de costa a partir de los DEM, como primera instancia se buscaba definir la línea de costa con la curva de nivel con elevación cero ($z=0$). Sin embargo, se presentaron dificultades para obtener la línea de costa en toda el área de estudio al tratarse de una playa estrecha y con una pendiente muy suave, por lo que fue necesario realizar varios procesos, los cuales son mencionados más adelante, y que permitieran cuantificar los cambios morfológicos en la zona de estudio.

Sección 3. Análisis del cambio de la línea de costa: En esta sección se cuantificaron los cambios que se presentaron en la zona de estudio durante el periodo de un año que abarcó la investigación. Para hacer esta cuantificación, se hizo uso del software Digital Shoreline Analysis System (DSAS) por sus siglas en inglés.

Sección 4. Oleaje y correlación de oleaje con el cambio de la línea de costa: Esta sección corresponde a una caracterización del clima del oleaje en la zona y un análisis del oleaje del año correspondiente a los vuelos del dron y su posible correlación con el cambio de línea de costa.

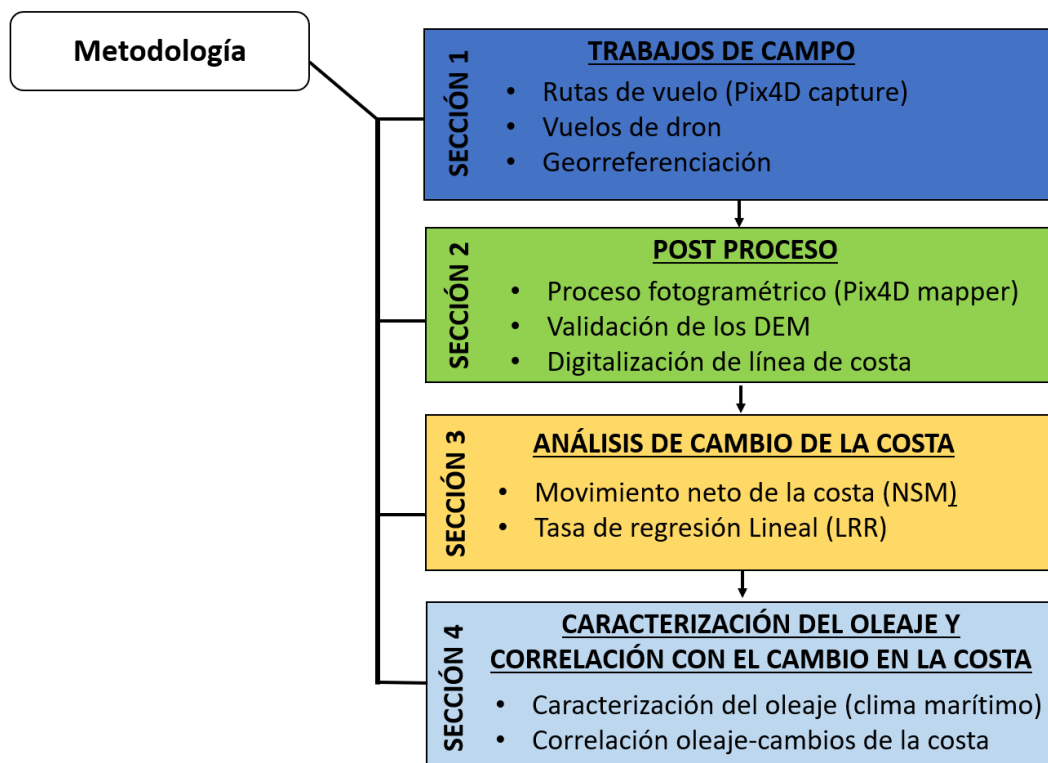


Figura 6: Metodología

3.1 Trabajo de campo

Las campañas de campo incluyeron las tareas de crear las rutas de vuelo, realizar los vuelos de dron, así como la distribución y levantamiento topográfico de los puntos de control que sirven para darle una referencia espacial a los resultados obtenidos. El equipo utilizado para los vuelos fue un cuadracóptero phantom 4 profesional. Los puntos de control se levantaron con un equipo GPS marca Leica, conformado por el par de antenas GS14 y GS15.

3.1.1 Rutas de vuelo

Los planes de vuelo fueron realizados con la ayuda del software pix4capture, especializado para planificar y controlar vuelos de drones para mapeo profesional y captura de datos. Este programa ayuda a definir fácilmente el tamaño de una misión para mapear áreas de diversos

tamaños y personalizar los parámetros de mapeo como el traslape entre las imágenes, el ángulo de la cámara y la altitud de vuelo según las necesidades (Pix4Dcapture: free drone flight planning mobile app. | Pix4D 2017.).

3.1.2 Vuelos de dron

Para hacer los vuelos de dron, con las rutas planeadas anteriormente, se utilizó un dron multi rotor DJI Phantom 4 (Figura 7), que cuenta con una cámara de 12.1 mega pixeles y capacidad de realizar vuelos con una autonomía de 24 minutos (DJI 2016). La Tabla 1 muestra las especificaciones del equipo utilizado.



Figura 7: Phantom 4, DJI 2017

Tabla 1: Especificaciones técnicas Phantom 4
Especificaciones Phantom 4

<i>Peso (batería y hélices incluidas)</i>	1368 g
<i>Tamaño diagonal (sin hélices)</i>	350 mm
<i>Velocidad máx.</i>	72 km/h
<i>Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar</i>	6 000 m
<i>Resistencia al viento máx.</i>	10 m/s
<i>Tiempo de vuelo máx.</i>	30 minutos aprox
<i>Rango de temperatura de funcionamiento</i>	De 0 a 40 °C
<i>Sistemas de posicionamiento por satélite</i>	GPS / GLONASS

3.1.3 Puntos de control

Para hacer la georreferenciación de las imágenes son necesarios puntos de control terrestres. La precisión de la georreferenciación depende de la cantidad, precisión y distribución de los puntos de control terrestre (*Ground Control Points*, GCP). La distribución de GCP tiene una gran influencia en la precisión de la corrección geométrica de las imágenes adquiridas a través de sensores remotos. En general, se requiere que la distribución de GCP sea uniforme, para que puedan controlar completamente la precisión de las regiones cartográficas (Zhang et al. 2009).

Para fines de este trabajo, se utilizaron 16 puntos de control distribuidos de manera uniforme haciendo una fila de cuatro puntos de control a cada 350 metros dentro de los 1.4 km de la zona de estudio (Figura 8). La precisión de los resultados de la georreferenciación mejora al agregar más GCP, pero un número excesivo puede generar dificultades de cálculo y no mejora la precisión de manera significativa. En una región, si hay una gran cantidad de GCP en una zona, tendrá una mayor precisión que aquella en la que hay menos GCP. Además, si los GCP son de “distribución uniforme”, la precisión de la corrección será mejor (Zhang et al. 2009)



Figura 8: Distribución de puntos de control en área de estudio

3.2 Post Proceso

Los trabajos de post proceso incluyeron las tareas de realizar el procesamiento fotogramétrico a través del software pix4D mapper en cuyo flujo de trabajo está integrado el algoritmo Structure from Motion (SfM). De igual forma se realizó la digitalización de la línea de costa a partir de los modelos digitales de elevación obtenidos del proceso fotogramétrico.

3.2.1 Proceso fotogramétrico

Para aplicar el algoritmo SfM para fines de este estudio se utilizó el software fotogramétrico Pix4D mapper, el cual es un software de procesamiento profesional desarrollado en Computer Vision Lab en Suiza, que se puede aplicar para convertir miles de imágenes tomadas por un vehículo aéreo o aeronave liviano no tripulado en modelos de superficie y nubes de puntos 2D o 3D referenciados geográficamente (<http://pix4d.com>). Además, Pix4D presenta un paquete de software Pix4D mapper que incluye “rayCloud”, un nuevo concepto que amplía la visualización de la vista estéreo y aumenta la precisión de los resultados del modelado 3D.

Pix4D proporciona un conjunto de datos y metadatos en todas las imágenes, modelos de cámara, nubes de puntos, mallas, mediciones y un informe completo de calidad técnica. El flujo de trabajo de Pix4D consta de tres pasos: procesamiento inicial, densificación de la nube de puntos y generación del DEM y ortomosaico (Figura 9).

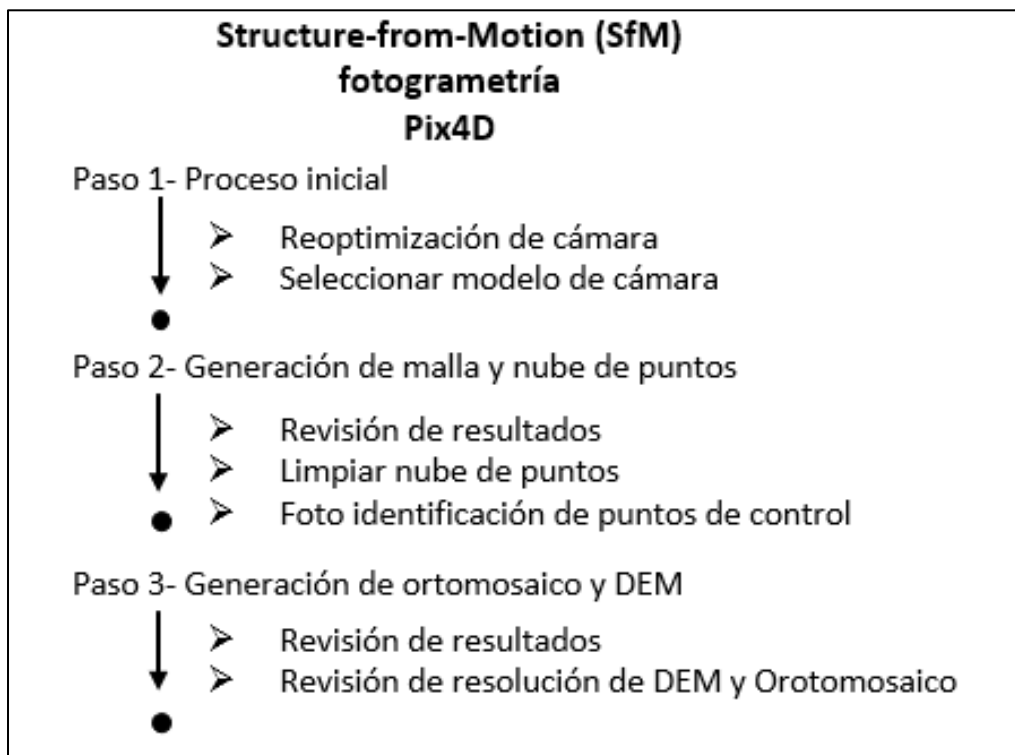


Figura 9: Flujo de trabajo Pix4D

3.2.2 Validación de los DEM

Ruzgienė et al. (2015) mencionan que la regla de oro para evaluar la precisión de los datos obtenidos de la fotogrametría con UAV es del orden de dos veces el valor de la distancia de muestreo en el suelo (GSD, por sus siglas en inglés), en la dirección “X” e “Y” y tres veces GSD en la altitud “Z”. De lo contrario, podrían existir grandes limitaciones en la precisión de los datos obtenidos.

La distancia de muestreo en el suelo (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos en el suelo. Cuanto mayor sea el valor de GSD en la imagen, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles menos visibles. El GSD está relacionado con la altura del vuelo: cuanto mayor sea la altitud del vuelo, mayor será el valor GSD. Otros factores que intervienen en su cálculo son: el sensor de la cámara y su distancia focal, como se muestra en la Figura 10 (Pix4D, 2019).

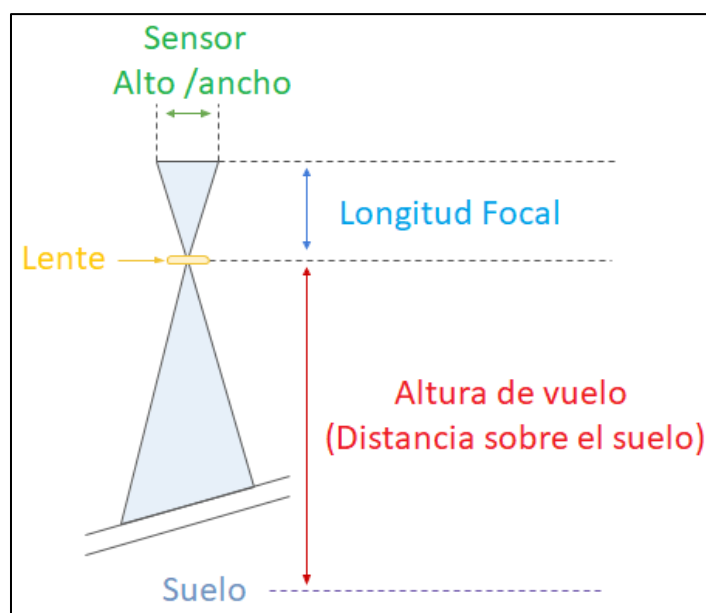


Figura 10: factores importantes para el cálculo del GSD, Pix4D

El GSD se mide en cm/píxel, define cuánto mide un píxel en la imagen final y determina la resolución espacial de la misma.

Cuando se proyecta cada píxel en el suelo no es perfectamente cuadrado, así que cuando calculamos el GSD, usamos el mayor (el peor) de estos dos valores:

$$GSD_h = \frac{H * S_h}{fl * I_h}$$

$$GSD_w = \frac{H * S_w}{fl * I_w}$$

donde:

H es la altura de vuelo [m]

S_h es el parámetro de alto del sensor de la cámara [mm]

S_w es el parámetro de ancho del sensor de la cámara [mm]

fl es la longitud focal de la cámara en [mm]

I_h es alto de la imagen [píxel]

I_w es el ancho de la imagen [píxel]

3.2.2.1 Reporte de calidad de Pix4D

Como primer método para la evaluar la calidad de los DEM se tomó en cuenta los resultados obtenidos por el software Pix4D a través de su reporte de calidad. En función de los puntos de control, se considera como un resultado aceptable cuando los puntos de control tienen un error menor a dos veces el GSD promedio (Pix4D, 2017)

Por lo tanto, se generaron los reportes de calidad de cada campaña realizada con el objetivo de evaluar la calidad de los resultados obtenidos.

3.2.2.2 Perfiles DEM vs Perfiles GPS

Adicionalmente se usaron los resultados de levantamientos topográficos de perfiles de playa. La tecnología GPS utilizada para llevar a cabo estos levantamientos ha demostrado ser altamente eficiente para la medición de perfiles, permitiendo tener una gran resolución espacial al medir una gran cantidad de datos, con precisiones milimétricas y pudiendo ser operado hasta por una sola persona (Lee et al., 2013). Debido a esto, se decidió realizar una comparativa de los datos obtenidos a través de un levantamiento de perfiles de playa con el uso de tecnología DGPS en la zona de estudio, en contraste con los perfiles de playa obtenidos a través de los DEM. El equipo GPS utilizado es de tipo diferencial, por lo tanto, se hace uso de dos antenas; una como base y una como rover o móvil

Los perfiles de playa fueron levantados específicamente durante la campaña del mes de agosto haciendo uso de un equipo DGPS marca Leica conformado por el par de antenas GS14 y GS15 en su modalidad RTK (*Real Time Kinetics*). Los perfiles de playa se realizaron de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se coloca la antena base que está conectada a la estación referenciada y que se ubica en la azotea del edificio del LICP para activar el modo RTK del GPS.
- La antena móvil o rover se coloca en un bastón el cual es adaptado a una mochila que se lleva en la espalda con la finalidad de mantener las manos libres y poder operar la controladora del GPS.
- Antes de iniciar el levantamiento de los perfiles, se realiza una medición de la altura de la antena colocada en la mochila.
- Los recorridos para el levantamiento de los perfiles de playa se realizaron desde el inicio de la duna y abarcando únicamente la zona seca de la playa, como se muestra en la Figura 11.
- Para realizar el postproceso se descargan los datos utilizando el software Leica Geo Office con el cual se obtiene la altura ortométrica de cada punto colectado por el GPS

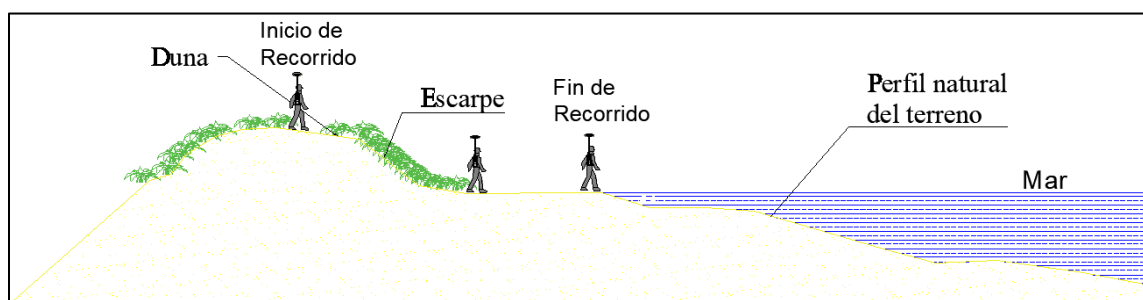


Figura 11: Esquema de recorrido para levantamiento de perfiles de playa con GPS

3.2.3 Digitalización de líneas de costa

El término de línea de costa está presente en muchas bases de datos geográficas y de cartografía oficial. La línea de costa compone un elemento que es fundamental en los procesos de gestión, análisis y planificación de las zonas costeras. Si bien su levantamiento a escalas que permitan tener un gran detalle para su posterior uso requiere de tener una delimitación geométrica muy precisa y de establecer criterios rigurosos para su definición, estos criterios deben ser seleccionados teniendo la certeza y claridad de las intenciones que

vayan de acuerdo con el uso que se le dará posteriormente. Por lo tanto, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y un correcto uso de los modelos de procesamiento de datos, son elementos clave para la digitalización de la línea de costa, así como para los análisis que posteriormente sean realizados con ella.

Para fines de este trabajo, resulta fundamental la digitalización de la línea de costa sobre modelos digitales de elevación u ortofotos obtenidos a través de los procesos fotogramétricos anteriormente descritos. Se utilizaron diferentes procedimientos para obtener de manera correcta la línea de costa en el área de estudio, como se presenta a continuación. Tras su obtención, se integraron los resultados a un sistema de información geográfica para hacer uso de sus capacidades analíticas para la obtención de diferentes indicadores que describan el cambio morfológico de la zona de estudio.

3.2.3.1 Curvas de nivel o isolíneas

Las curvas de nivel son líneas que conectan ubicaciones de igual valor en un arreglo espacial de datos que representa fenómenos continuos como: elevación, temperatura, precipitación, contaminación o presión atmosférica. Las líneas de curvas de nivel, generalmente se denominan isolíneas, pero también pueden tener términos específicos según lo que se esté midiendo. Algunos ejemplos son isobaras para la presión, isotermas para la temperatura, isoyetas para la precipitación o curvas de nivel para un terreno.

La distribución de las líneas de curvas de nivel muestra cómo cambian los valores a través de una superficie. Cuando hay poco cambio en un valor, las líneas están más separadas entre sí. Cuando los valores suben o bajan rápidamente, las líneas están más juntas.

En este caso se utilizaron los DEM generados del proceso fotogramétrico y se procedió a obtener las isolíneas o curvas de nivel utilizando la herramienta “contour” del “Spatial Analyst Tools” de ARCMAP. Obtenidas las isolíneas, la curva que corresponde a la línea de costa es aquella que tiene la cota $Z = 0$ (Torres-Freyermuth et al. 2019).

3.2.3.2 Detección de bordes

Cuando se procesan imágenes, la detección de los bordes de una imagen es de suma importancia y utilidad, pues facilita muchas tareas, entre ellas, el reconocimiento de objetos, la segmentación de regiones, entre otras (Valverde, J. 2007)

Uno de los métodos relacionados con la detección de bordes es el uso de la primera derivada, usada porque toma el valor de cero en todas las regiones donde no existe variación de la intensidad y tiene un valor constante en toda la transición de intensidad. Por lo tanto, un cambio de intensidad se manifiesta como un cambio brusco en la primera derivada (Pajares y de la Cruz, 2001), característica que es usada para detectar un borde, y en la que se basa el algoritmo de Canny, usado en este estudio.

3.2.3.3 Cambio de pendiente (slope)

Las posiciones de la línea de costa pueden hacer referencia a varias características diferentes, como la línea de vegetación y la línea de división entre zona húmeda/seca (E.A. Himmelstoss 2009).

En este caso un identificador que se presentó durante todo el tiempo en la zona de estudio fue el escarpe en la playa. Esta característica es producida en la zona de estudio por la acción del oleaje. Para poder obtener el escarpe a partir de los DEM fue necesario hacer uso de la herramienta “slope” de ArcGis.

La herramienta “slope” identifica la pendiente (gradiente o tasa de cambio máximo en el valor z) desde cada celda de una superficie ráster como son los DEM obtenidos. Para cada celda, dicha herramienta calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho celdas vecinas identifica el descenso (o ascenso) cuesta abajo (o arriba) más inclinado desde la celda (ArcGIS for Desktop, 2017).

Finalmente, el escarpe obtenido a través de la herramienta “slope” fue el identificador que es usado para cuantificar el cambio en la zona de estudio.

3.3 Análisis de cambio de la costa

La estimación de cambio de la línea de costa se realizó con la herramienta DSAS, la cual calcula las tasas de cambio de la línea de costa en base a las diferencias medidas entre las posiciones de la línea costera asociadas con períodos de tiempo específicos (Himmelstoss, E. et al., 2018)

Esta extensión, desarrollada por el Servicio Geológico Norteamericano (USGS), permite calcular mediante fórmulas matemáticas, parámetros que ayudan a determinar el estado evolutivo dentro del intervalo de tiempo estudiado.

Los parámetros estadísticos utilizados para evaluar el cambio de la línea de costa en la zona en este estudio son: Movimiento Neto de la Costa (NSM, Net Shoreline Movement) y la Tasa de Regresión Lineal (LRR, Linear Regression Rate).

3.3.1 Movimiento neto de la costa “NSM”

Este estadístico calculado mediante el DSAS reporta la distancia en metros que existe entre la línea de costa más reciente y la más antigua (Figura 12). De los valores obtenidos tras realizar los cálculos, los negativos corresponden a erosión (disminución del ancho de la playa) y valores positivos representan acreción (aumento en el ancho de la playa).

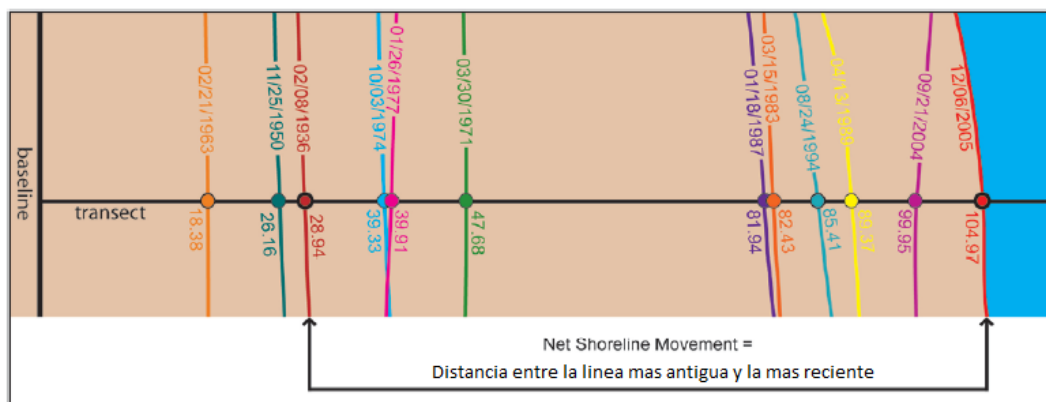


Figura 12: Ejemplo de NSM entre dos líneas de costa, manual DSAS

3.3.2 Tasa de regresión lineal “LRR”

La tasa de regresión lineal reporta la tasa de cambio de la línea de costa utilizando los datos de todas las líneas de costa existentes y se calcula ajustando una línea de regresión de

mínimos cuadrados a todos los puntos de la costa para un transecto particular donde la pendiente de la línea es la tasa de regresión lineal en metros/año (Figura 13). De igual forma valores negativos de la tasa de cambio indican que la playa se erosionó y valores positivos que el ancho de playa creció.

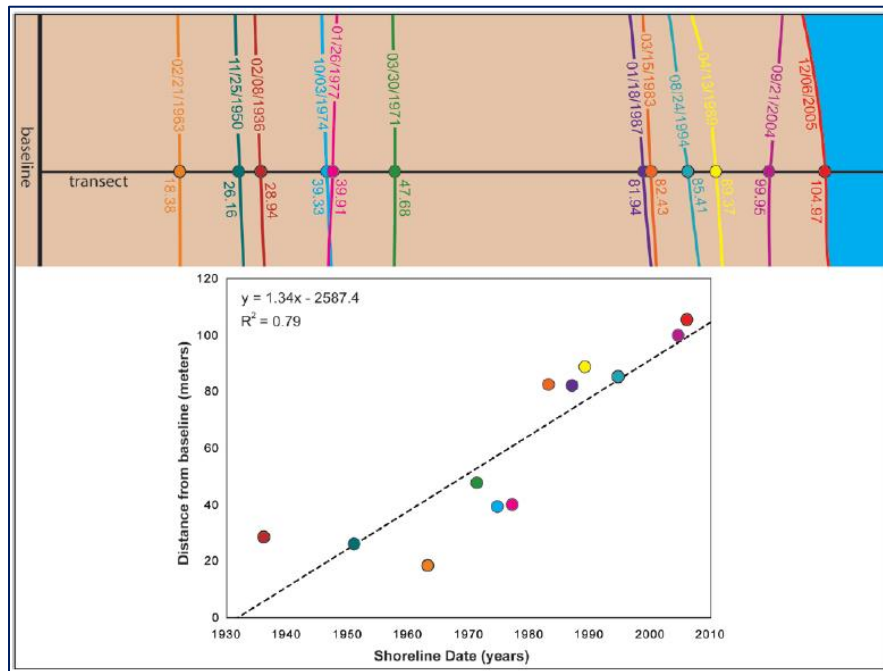


Figura 13: Ejemplo del cálculo de LRR entre un grupo de líneas de costa, manual DSAS

3.4 Caracterización del oleaje y correlación con el cambio de la línea de costa

Con el fin de determinar la influencia del oleaje sobre la línea de costa en la zona de estudio, se usaron datos de un equipo Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) instalado por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos costeros de la UNAM a 10 metros de profundidad y a una distancia aproximada de 10 km de la costa (Figura 3). Finalmente, se realizó la correlación de los cambios en la línea de costa debido al oleaje que se presentó durante el tiempo que duró el estudio.

3.4.1 Caracterización de eventos

La caracterización de los eventos se realizó a través de una rutina de Matlab, la cual encuentra los valores máximos mensuales durante el periodo de estudio a partir de los datos de altura de ola significativa, periodo y dirección. Como el estudio también se realizó durante la época

de Nortes, algunos de estos pudieron verse durante la caracterización de los eventos. Se clasificaron como eventos aquellos que presentaron una altura de ola significativa H_s mayor de 1 m de altura y una duración igual o mayor a 90 horas. De igual manera se presentó un evento de turbonada en el mes de mayo.

4 Resultados

4.1 Trabajos de campo

4.1.1 Rutas de Vuelo

Para cubrir el área de estudio se crearon tres misiones de vuelo de 500 metros de largo x 60 metros de ancho cada una (Figura 14). Se utilizó un traslape del 80% entre imágenes y una altura de vuelo de 40 metros.

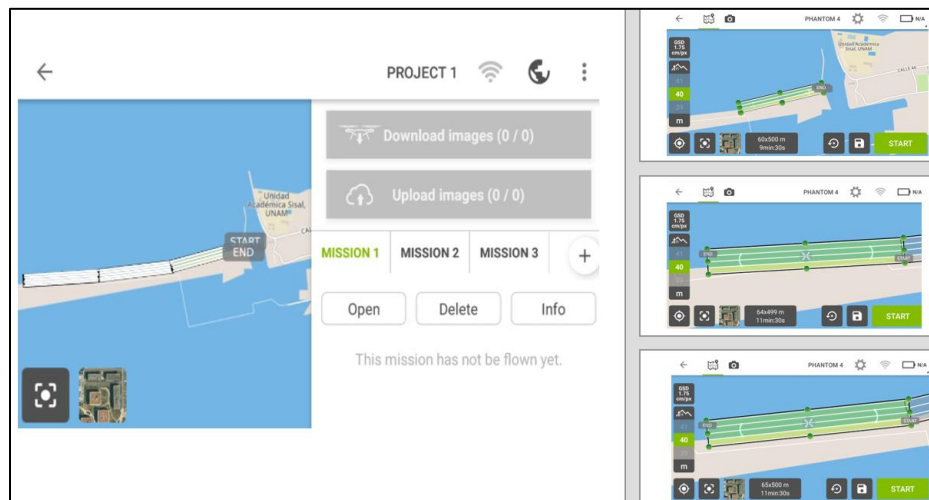


Figura 14: Rutas prediseñadas para vuelos, Pix4D capture

4.1.2 Levantamientos

Se realizaron 10 levantamientos de diciembre de 2016 a diciembre de 2017, adquiriendo en promedio 1635 imágenes en cada levantamiento (Tabla 2), abarcando un área aproximada de 75,000 m² en un largo de 1,460 metros por 50 metros de ancho.

Tabla 2: Fechas de vuelos y numero de fotos obtenidas en cada vuelo

vuelo	fecha	numero de fotos
1	08/Diciembre/2016	1540
2	19/Enero/2017	1540
3	23/Marzo/2017	1896
4	27/Abril/2017	1827
5	08/Mayo/2017	1535
6	15/Junio/2017	1803
7	28/Julio/2017	1519
8	31/Agosto/2017	1530
9	22/Noviembre/2017	1533
10	13/Diciembre/2017	1540
	promedio	1,635.88

4.1.3 Georreferenciación

Los puntos de control fijos para este trabajo se realizaron a base de tubos de PVC de 4" de diámetro y 1.20 metros de alto, enterrados parcialmente en la arena y con la tapa en uno de los extremos pintadas con aerosol de color rojo para poder diferenciarla de la vegetación. De igual forma fueron colocadas cerca de la línea de costa puntos de control móviles que consistieron en tablas de madera con dimensiones 0.40 x 0.40 m y pintadas de color rojo y negro (Figura 15) para su fácil identificación durante los trabajos de postproceso. La variación en los números de puntos de control en cada vuelo se debió a que el área de estudio es una zona de difícil acceso y que algunos de los puntos de control fijos desaparecieron a consecuencia de los efectos climatológicos o por acciones de vandalismo.



Figura 15: Punto de control semi-fijo (izquierda), Punto de control móvil (Derecha)

Las coordenadas tridimensionales UTM de estos puntos se midieron con un receptor GNSS Leica, funcionando en modo RTK, con la estación base en un pilar geodésico ubicado en la azotea del Instituto de Ingeniería de la UNAM campus Sisal, a menos de 500 metros de la zona de estudio.

4.2 Post-proceso

4.2.1 Proceso fotogramétrico

Los resultados del proceso fotogramétrico consisten en las ortofotos y los DEM de cada levantamiento. Como ejemplo la Figura 16 muestra el resultado del DEM y ortofoto del mes de agosto y el anexo 1 contiene cada uno de los DEM y ortofotos obtenidas durante todas las campañas realizadas en el tiempo de duración del estudio.

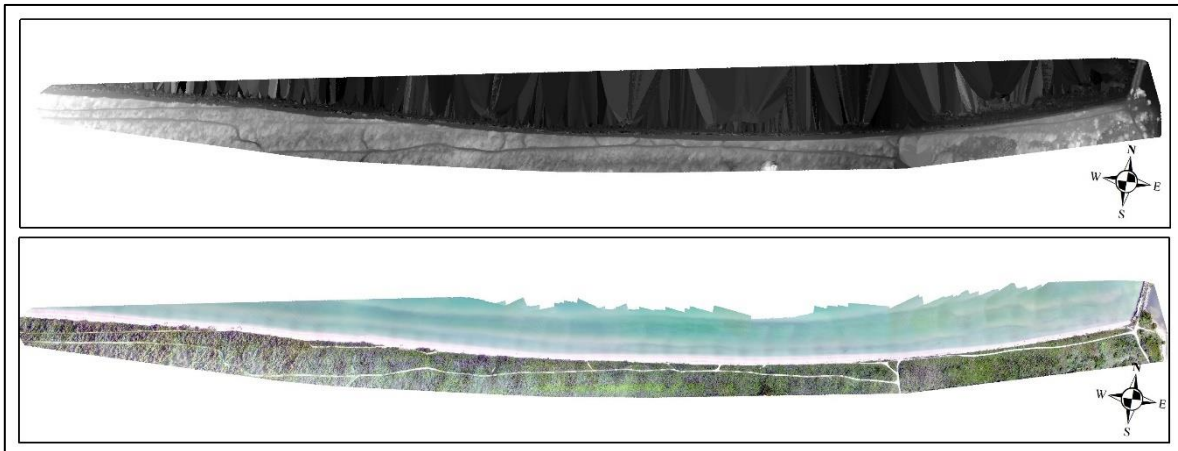


Figura 16: DEM (parte superior) y ortofoto (parte inferior) del mes de agosto de 2017

4.2.2 Validación de los DEM

4.2.2.1 Reportes de calidad generados por pix4D

La Figura 17 presenta un extracto del informe de calidad de los resultados del proceso fotogramétrico de la campaña de campo del mes de agosto generado por el software Pix4D mapper. Se observa en la parte superior “Summary” que el apartado “Average Ground Sampling Distance (GSD)” tiene un valor de 2.35 cm (0.023 m) y en la parte inferior “Quality Check” el apartado “georeferencing” el “mean RMS error” tiene un valor de 0.019 m por lo que se cumple la condición de que el error promedio es menor a dos veces el valor del GSD y, por consiguiente, la georeferenciación tiene una calidad aceptable.

Summary		
Project	palmar agosto	
Processed	2017-09-09 22:47:43	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.35 cm / 0.92 in	
Area Covered	0.3278 km ² / 32.7848 ha / 0.1266 sq. mi. / 81.0549 acres	
Quality Check		
Images	median of 2817 keypoints per image	✓
Dataset	1623 out of 1918 images calibrated (84%), all images enabled	⚠
Camera Optimization	2.83% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 438.981 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 16 GCPs (16 3D), mean RMS error = 0.019 m	✓

Figura 17: Extracto del informe de calidad del mes de agosto generado por el software de procesamiento.

La Tabla 3 presenta un resumen de los resultados de los informes de calidad para cada uno de los procesos fotogramétricos realizados, se puede ver que en el mes de mayo los resultados de calidad en la georreferenciación no obtuvieron la calidad mínima esperada. Las imágenes de todos los extractos de los reportes de calidad se presentan en el anexo 2. Los puntos de control variaron en cantidad debido a las razones mencionadas anteriormente en el apartado 4.1.3.

Tabla 3: Resumen de resultados de informes de calidad

Mes	Año	puntos de control	GSD (m)	mean RMS error (m)	2GSD (m)	RMS<2GSD
diciembre	2016	16	0.0182	0.019	0.036	si
enero	2017	16	0.0209	0.011	0.042	si
marzo	2017	15	0.0175	0.009	0.035	si
abril	2017	13	0.0187	0.011	0.037	si
mayo	2017	14	0.0224	0.113	0.045	no
junio	2017	15	0.0225	0.008	0.045	si
julio	2017	14	0.0245	0.041	0.049	si
agosto	2017	16	0.0235	0.019	0.047	si
noviembre	2017	24	0.0119	0.007	0.024	si
diciembre	2017	20	0.0126	0.006	0.023	si

4.2.2.2 Perfiles GPS vs Perfiles DEM

La Figura 18 muestra el DEM obtenido de la campaña de campo del mes de agosto y la ubicación de los perfiles (p1, p2, p3 y p4) con los cuales se realiza la comparativa con los perfiles GPS. Las coordenadas UTM de los perfiles pueden observarse en la Tabla 4

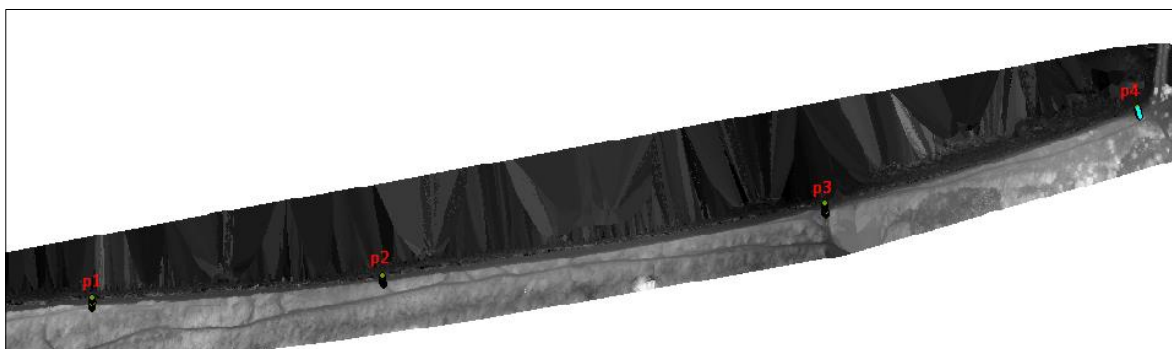


Figura 18: Ubicación de perfiles dentro de la zona de estudio, modelo digital de elevación del mes de agosto

Tabla 4: Perfiles de playa

PERFILES DE PLAYA			
Perfil 1	X	Y	Z
Inicio	805032.285	2342699.581	3.038
Fin	805032.841	2342713.647	0.057
Perfil 2	X	Y	Z
Inicio	805409.791	2342728.971	1.602
Fin	805407.869	2342742.306	-0.057
Perfil 3	X	Y	Z
Inicio	805982.216	2342819.916	1.152
Fin	805981.054	2342835.867	-0.013
Perfil 4	X	Y	Z
Inicio	806389.260	2342946.077	1.635
Fin	806386.257	2342959.928	-0.084

Al realizar la comparativa de los perfiles para el perfil uno se obtuvo un coeficiente de determinación con una R^2 de 0.914 como se puede observar en la Figura 19. En la Figura 20 se puede observar una comparativa y la correlación grafica de los perfiles GPS vs DEM

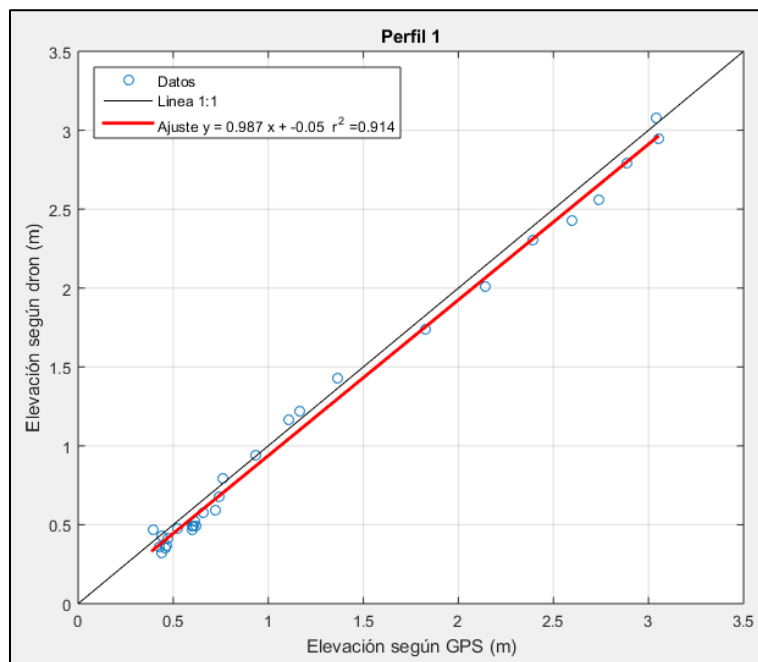


Figura 19: Correlación de los datos obtenidos para el perfil uno, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.

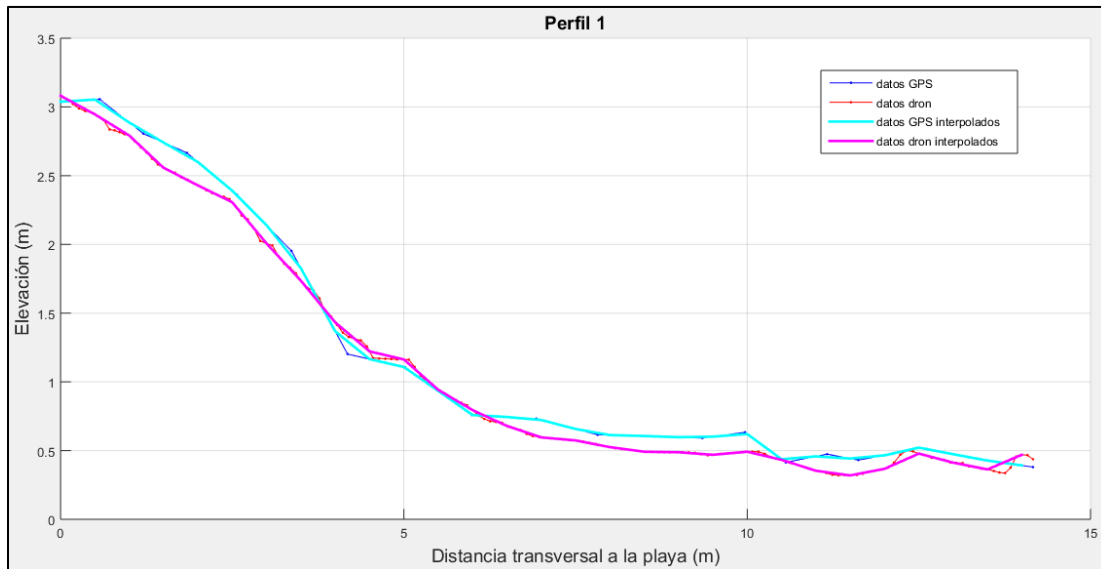


Figura 20: comparativa grafica perfil 1, GPS y dron, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM

El perfil dos presento una R^2 de 0.926, como se puede observar en la Figura 21. En la comparativa gráfica de la Figura 22, se puede observar la diferencia existente entre el perfil obtenido con el levantamiento GPS y el perfil obtenido del DEM.

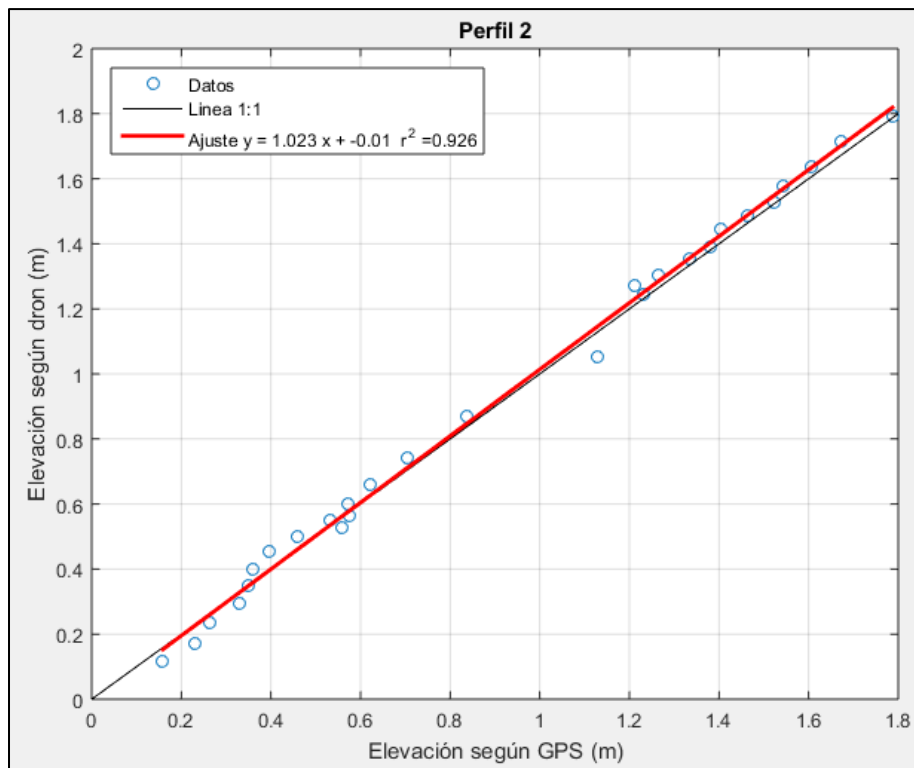


Figura 21: Correlación de los datos obtenidos para el perfil dos, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.

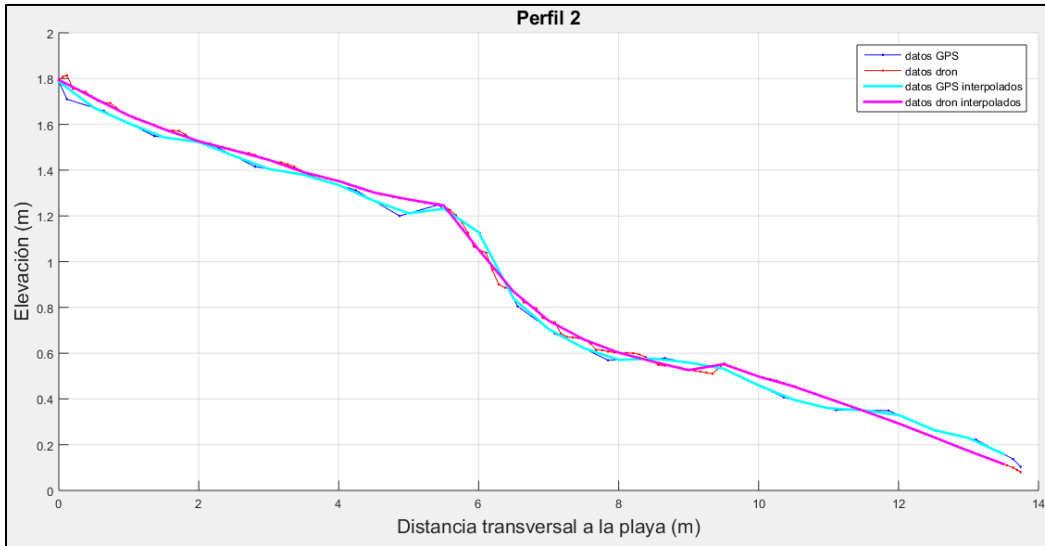


Figura 22: comparativa grafica perfil dos, GPS y DEM, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM

En el perfil tres, se obtuvo una R^2 de 0.885, siendo el que obtuvo el menor coeficiente de determinación, en la comparativa GPS vs DEM como se puede ver en la Figura 23. En la Figura 24 se observa la comparación gráfica del perfil tres que presenta algunas diferencias entre el perfil GPS y perfil del DEM.

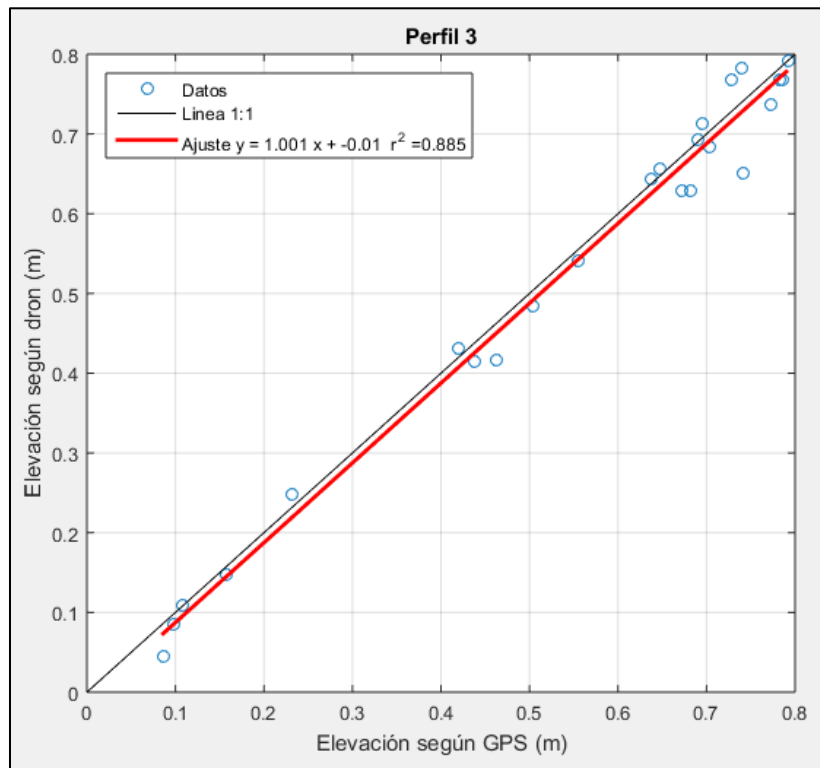


Figura 23: Correlación de los datos obtenidos para el perfil tres, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.

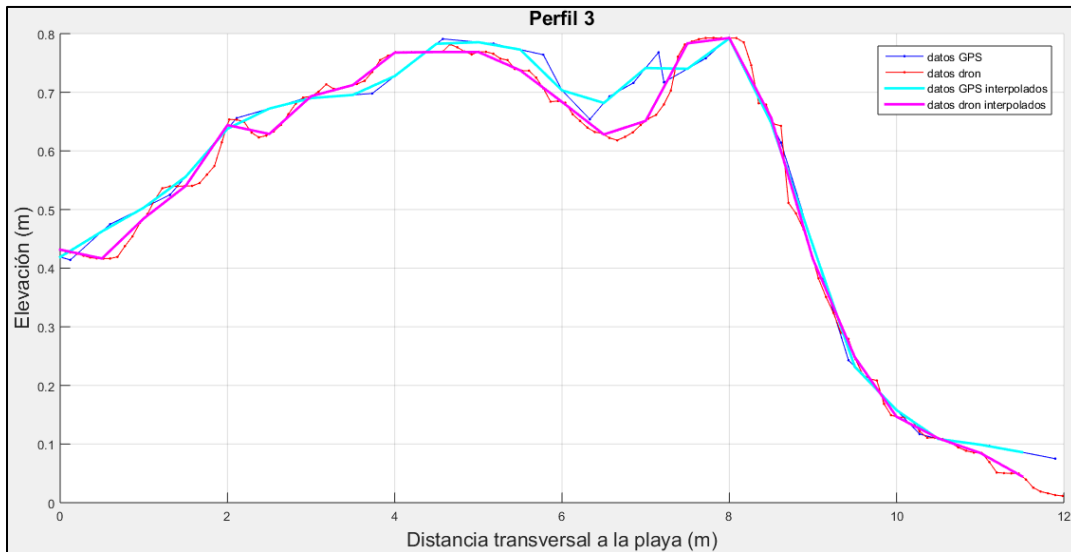


Figura 24: comparativa grafica perfil tres, GPS y DEM, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM

El perfil cuatro fue el que presentó el coeficiente de determinación más alto de los cuatro perfiles evaluados, con una R^2 de 0.975 (Figura 25). De igual forma la comparativa grafica de la Figura 26 es la que presenta una mejor relación en los levantamientos del perfil GPS y DEM.

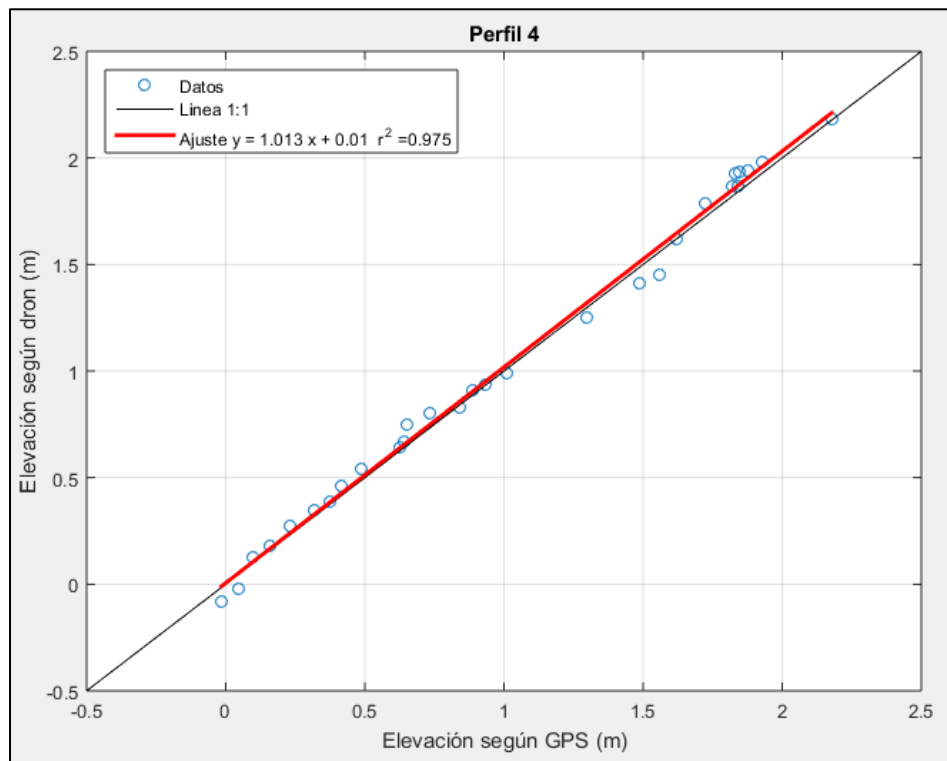


Figura 25: Correlación de los datos obtenidos para el perfil cuatro, los puntos en azul representan los datos de elevación obtenidos a partir del GPS y del DEM, la línea roja representa el ajuste de los datos.

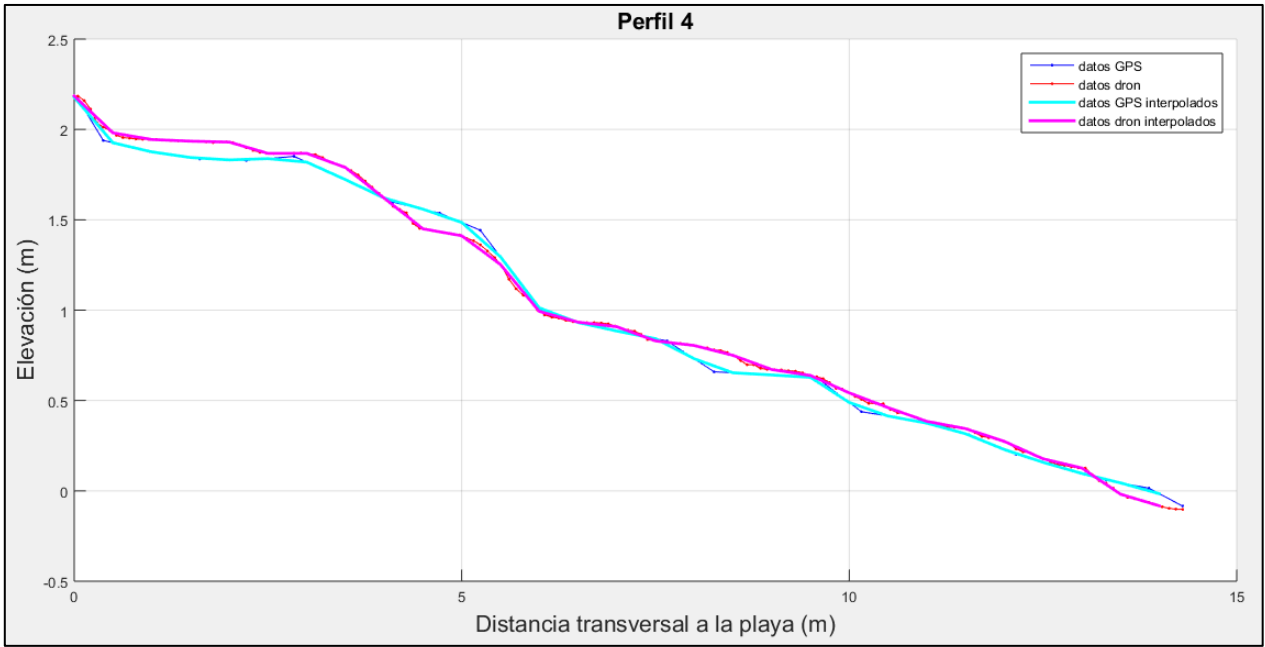


Figura 26: comparativa grafica perfil cuatro, GPS y DEM, línea azul perfil a partir de datos de GPS y línea azul datos a partir del DEM

Finalmente, la Figura 27 presenta la evaluación de los cuatro perfiles comparados. El coeficiente de determinación obtenido tiene un valor de R^2 de 0.912, lo cual se considera aceptable para este estudio.

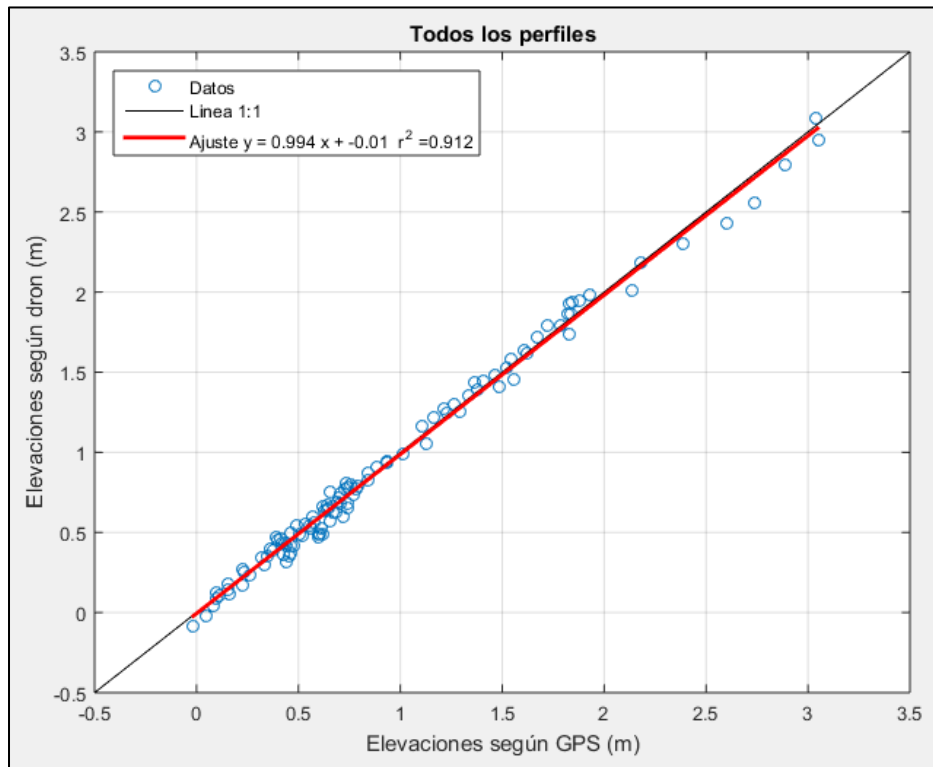


Figura 27: Evaluación GPS vs DEM, todos los perfiles

4.2.3 Digitalización de línea de costa

4.2.3.1 Curvas de nivel o isolíneas

Las curvas de nivel fueron obtenidas a partir de los modelos digitales de elevación georreferenciados. Utilizando la herramienta “spatial analyst tools” de ArcGis, se graficaron isobatas a cada 0.20 metros (Figura 28) con el objetivo de obtener la curva $z=0$ que represente la línea de costa.

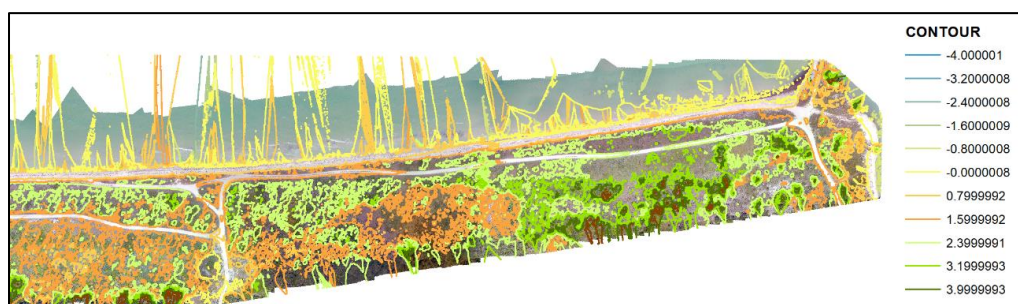


Figura 28: extracto de curvas de nivel en la zona de estudio a cada 0.80 m

Al realizar este proceso se encontró con la problemática de que la curva de nivel con elevación $z=0$ no definía totalmente la línea de costa dentro de la zona de estudio, al presentarse una playa tan estrecha y con un poco cambio de pendiente. Por lo que fue necesario realizar otros procesos que definieran la línea de costa, los cuales se presentan a continuación.

4.2.3.2 Detección de bordes

La Figura 29 muestra los resultados obtenidos tras aplicar el algoritmo de Canny para la detección de bordes al ortomosaico del mes de agosto. Como se puede observar los resultados no fueron los esperados ya que los bordes que fueron detectados no definieron con claridad ningún elemento que ayude a cuantificar el cambio de la costa en la zona de estudio.

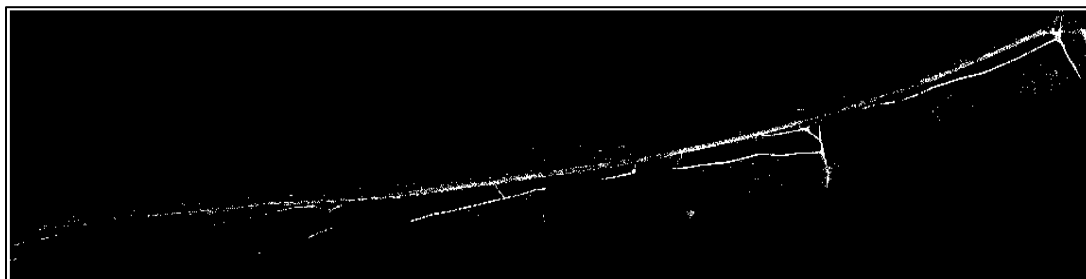


Figura 29: Resultados de la detección de bordes con algoritmo de Canny

4.2.3.3 Cambio de pendiente (slope)

Debido a que los dos primeros métodos mencionados anteriormente para digitalizar la línea de costa no proporcionaron los resultados esperados, fue necesario hacer uso de otro identificador que permitiera evaluar el cambio de la costa en la zona de estudio. Con la herramienta slope de ArcGis, se pudo definir el escarpe a lo largo de toda la zona de estudio a partir de los DEM (Figura 30).

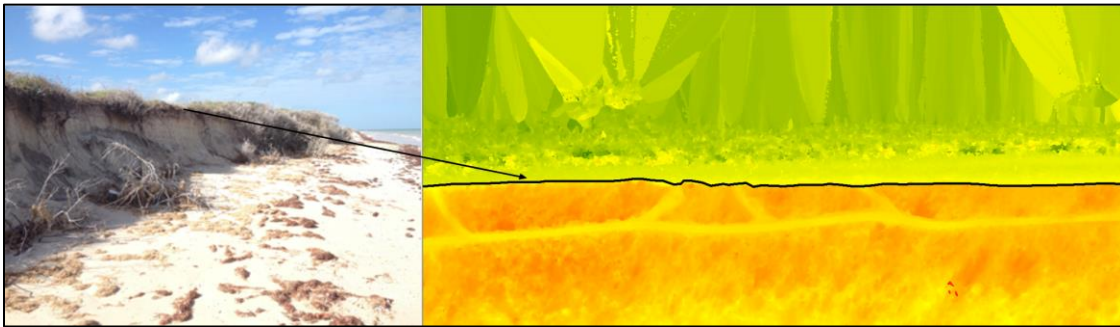


Figura 30: Escarpe del mes de agosto en la zona de estudio, a la izquierda el escarpe en la zona de estudio y a la derecha la línea del escarpe en planta obtenida a partir del DEM

Se repitió la operación para cada uno de los DEM obtenidos a través del proceso fotogramétrico, todos los escarpes se pueden apreciar en la Figura 31. Finalmente, el escarpe fue seleccionado como el indicador más adecuado para realizar la cuantificación del análisis en la zona de estudio.

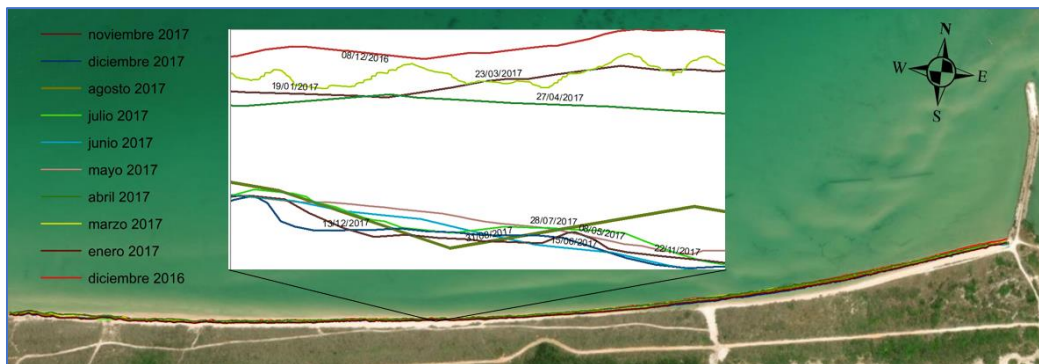


Figura 31: Escarpes en la zona de estudio, las líneas en colores representan los escarpes obtenidos en cada campaña de campo

4.3 Análisis de cambio en la costa

Para utilizar DSAS como primer paso debe trazarse una línea base paralela a las líneas de costa digitalizadas. Seguidamente se trazan transectos perpendiculares a la línea base y estos

cruzan las líneas de costa disponibles, separados entre sí una distancia definida a consideración del usuario. Las intersecciones de los transectos con las líneas de costa se utilizan para cuantificar a lo largo de cada transecto la distancia entre la línea base y las posiciones de las diferentes líneas de costa en diferentes fechas. Para fines de este trabajo se definieron 73 transectos a cada 20 metros (Figura 32)

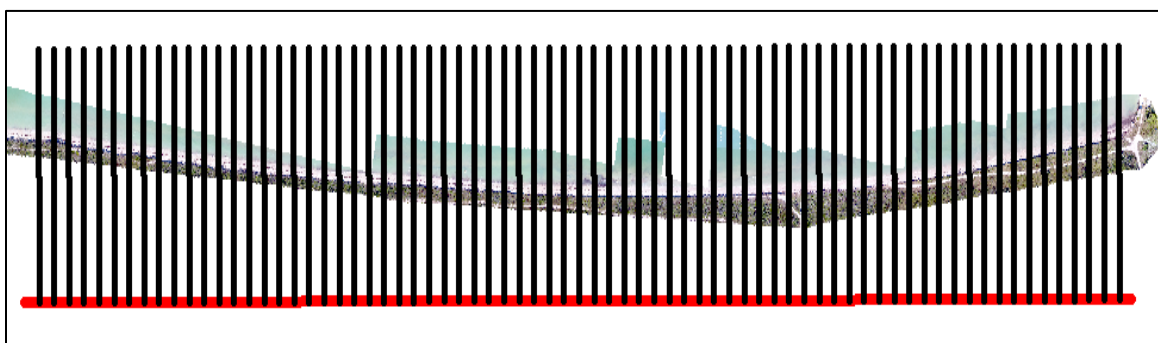


Figura 32: Línea base (en rojo) y transectos a cada 20 m (en negro)

4.3.1 Movimiento Neto de la Costa (NSM)

Para realizar el análisis del parámetro Movimiento Neto de la Costa (NSM) se utilizaron las líneas de escarpe de diciembre de 2016 y diciembre de 2017 debido a que para este estadístico se utilizan las líneas de costa más antigua y más reciente disponibles (Figura 33).

El Movimiento Neto de la Costa (NSM) muestran que, de diciembre de 2016 a diciembre de 2017 de los 73 transectos trazados para el análisis, todos tiene valores negativos, es decir, se presentó erosión en el 100% de la zona de estudio. El valor máximo de erosión registrado es de -6.71 m, en el transecto 9 (Figura 33). Los mayores valores de erosión se presentan en los primeros 600 metros de la zona de estudio a partir de la escollera oeste del puerto de abrigo, de los transectos 1 al 25. El valor promedio de Movimiento Neto de la Costa que se registro es de -4.0 metros. Un resumen de los resultados registrados puede verse en la Tabla 5.

4.3.2 Tasa de regresión lineal (LRR)

Para realizar el análisis del parámetro Tasa de Regresión Lineal (LRR) se utilizaron todas las líneas de escarpe digitalizadas (Figura 34).

La tasa de regresión Lineal (LRR) muestra que, de diciembre de 2016 a diciembre de 2017, todos los 73 transectos trazados para el análisis tienen valores negativos, es decir, se presentó

tasas de erosión en el 100% de la zona de estudio, coincidiendo con los resultados observados del parámetro NSM. El valor máximo de erosión registrado es de -6.24 m/año, en el transecto marcado con el número 20. De igual forma los mayores valores de Tasa de Regresión Lineal se presenta en los primeros 600 metros de la zona de estudio a partir de la escollera oeste del puerto de abrigo, de los transectos 1 al 25. El valor promedio de la Tasa de Regresión es de -4.2 metros/año. Un resumen de los resultados registrados puede verse en la Tabla 5

Tabla 5: Resumen de resultados del Movimiento Neto de la Costa (NSM)

Resumen de resultados (NSM)		
rango (m)	# de transectos	porcentaje (%)
0 a -2.1	3	4.11
-2.1 a -4.1	40	54.79
-4.1 a -6.1	22	30.14
-6.1 a -6.8	8	10.96
Total	73	100.00

Tabla 6: Resumen de resultados de Tasa de Regresión Lineal (LRR)

Resumen de resultados (LRR)		
rango (m/año)	# de transectos	porcentaje (%)
0 a -3.9	36	49.32
-3.9 a -5.8	27	36.99
-5.8 a -6.3	10	13.70
Total	73	100.00

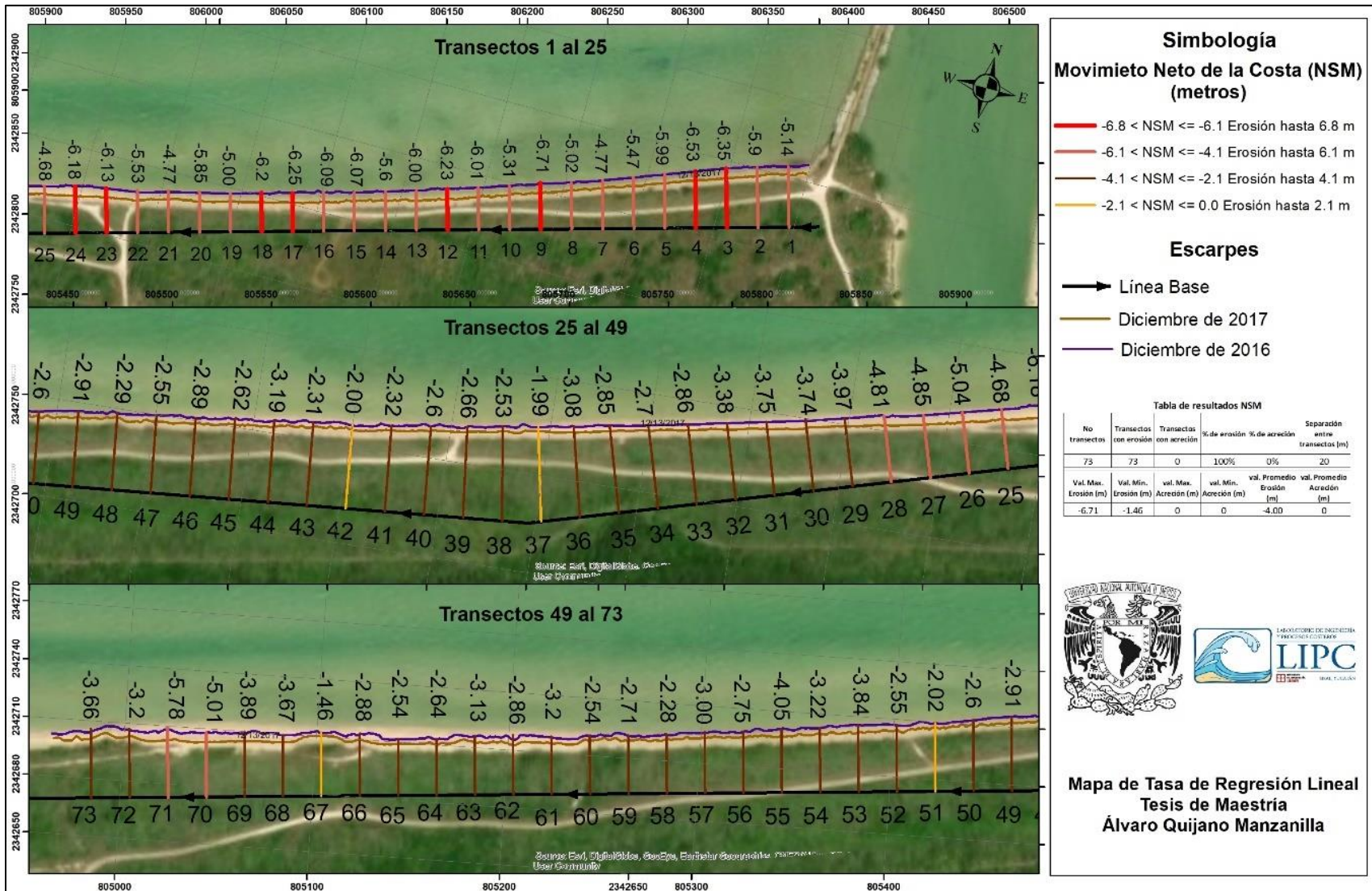


Figura 33: Resultados del Movimiento Neto de la Costa (NSM), en la parte superior valores obtenidos para los transectos del 1 al 25, parte media de los transectos 25 al 29 y en la parte inferior transectos del 49 al 73.

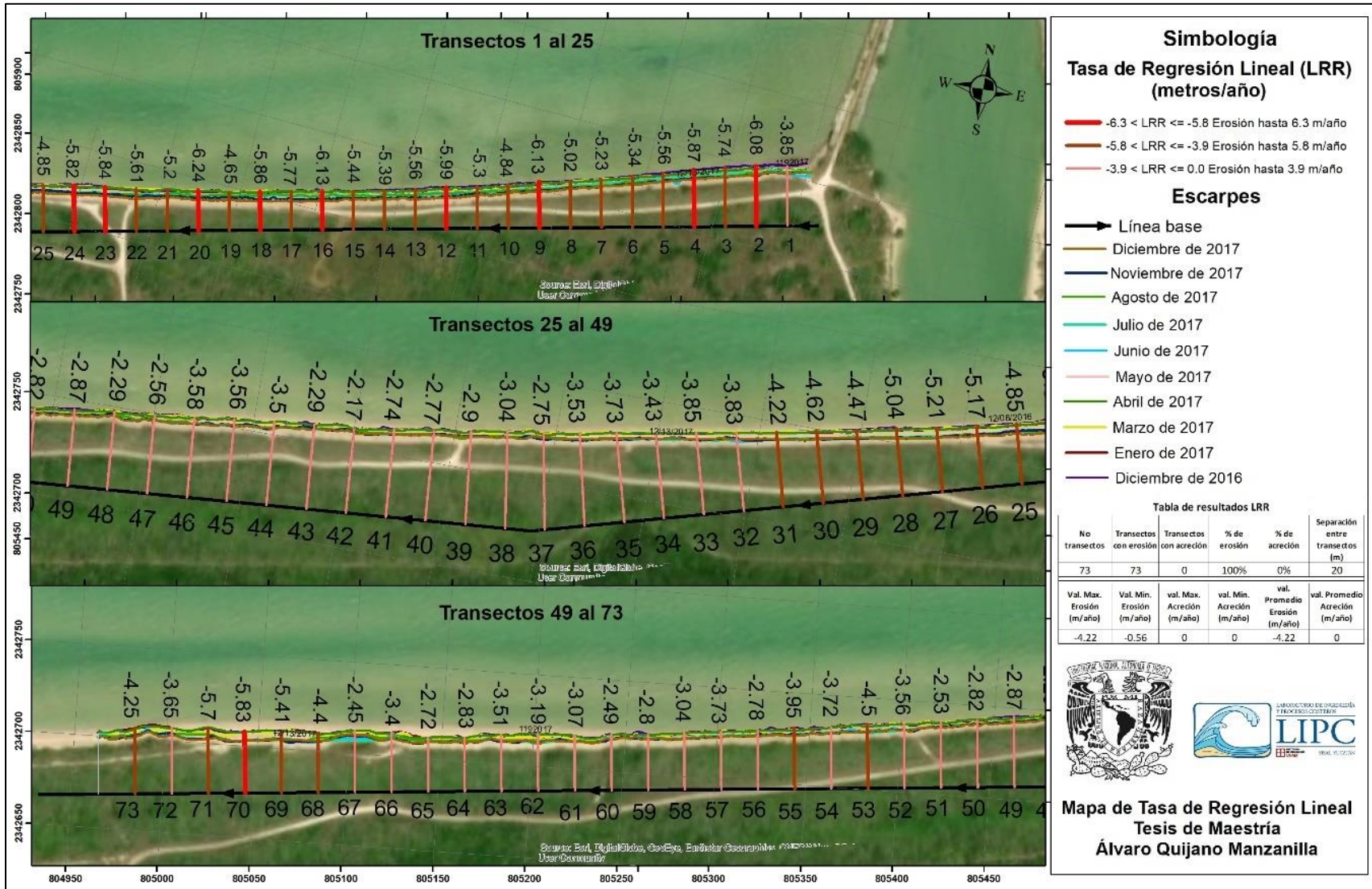


Figura 34: Resultados de la tasa de regresión lineal (LRR), en la parte superior valores obtenidos para los transectos del 1 al 25, parte media de los transectos 25 al 29 y en la parte inferior transectos del 49 al 73.

4.4 Caracterización del oleaje y correlación entre el oleaje y los cambios en la costa

4.4.1 Caracterización de eventos

La Figura 35 muestra la variación de la altura del oleaje durante el periodo de estudio (diciembre de 2016 a diciembre de 2017). Los puntos en color rojo representan la dirección del oleaje y las líneas verticales en color marrón representan los momentos en los que se realizaron los vuelos de dron. Con ello se pueden observar los eventos que ocurrieron entre cada campaña de campo.

Durante el periodo de estudio se presentaron eventos de nortes, brisas y un evento extremo conocido localmente como turbonada. Este se presentó a inicios del mes de mayo de 2017 y registró una altura máxima de 1.81 m. Por otro lado, los eventos de nortes pueden identificarse por la dirección del oleaje del NNW y los puntos rojos muy cercanos a la dirección de 0° y también aquellos oleajes que están entre 270° a 360° y con alturas de ola entre 0.4 m y 1.1 m. De igual forma las brisas se caracterizan por tener una dirección del NE y una variación diurna de la altura del oleaje que alcanza hasta un máximo de 1.1 m.

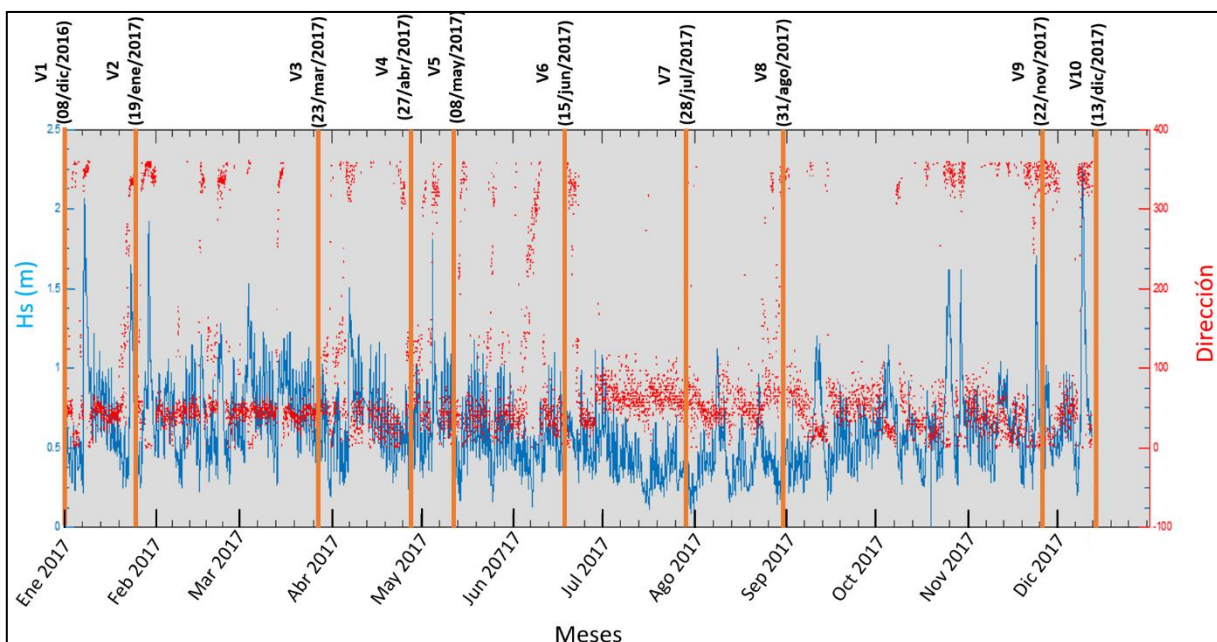


Figura 35: Serie temporal de altura y dirección de oleaje durante el periodo de estudio y vuelos de dron, la línea en azul representa la serie de oleaje y las alturas de este, los puntos en rojo la dirección del oleaje y las líneas en café las fechas en que se realizaron los vuelos de dron.

4.4.2 Cambios en la costa debido a los eventos

Para describir los cambios en la costa debido a los eventos de oleaje, se seleccionaron 10 de los 73 transectos utilizados para evaluar el movimiento neto de la costa (NSM) de la sección 4.3.1. Los transectos elegidos están distribuidos a lo largo de toda la zona estudio como se puede observar en la Figura 36, en color rojo y en la base su número correspondiente al transecto.

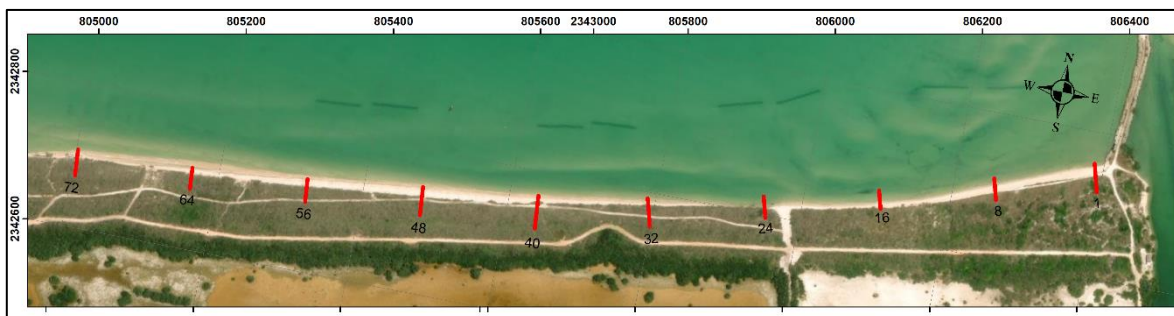


Figura 36: Transectos para evaluación de cambios en la costa por los eventos de oleaje, las líneas rojas representan la ubicación y número de los perfiles elegidos.

Los cambios en la posición del escarpe debido a los eventos de oleaje que se presentan en la zona durante el tiempo de estudio se observan en la Figura 37, tomando siempre como punto de partida o de comparación la línea de escarpe obtenida durante la campaña de diciembre de 2016.

Entre la primera campaña realizada en el mes de diciembre de 2016 y la segunda, realizada en enero de 2017 (V1-V2), se observa un evento de norte que supera los 2 m de altura de ola significativa y que genera un retroceso en la línea de escarpe en los transectos del 1 al 24, siendo el primer transecto y el más cercano a la escollera oeste el que presenta la mayor variación. El transecto 32 en la parte central y el transecto 72 en la parte final de la zona estudio presentan ligeros avances de la línea de escarpe. En los transectos del 30 al 64 nuevamente se obtuvieron valores negativos sin llegar a ser cambios importantes.

Entre la segunda y tercera campañas de campo realizadas en enero y marzo de 2017 respectivamente (V2-V3), se puede observar al menos dos eventos de oleaje que superaron los 1.5 metros de altura de ola significativa y con esto se continuo con la tendencia erosiva o de retroceso de la línea de escarpe en los primeros cuatro transectos siendo el transecto más

cercano a la escollera el que presenta el mayor valor de retroceso. El transecto 32 situado al centro de la zona de estudio se presentó un ligero avance. Posteriormente los transectos del 40 al 72 también presentaron valores negativos, sin embargo, ninguno de estos con grandes cambios con respecto a la posición observada del escarpe observada durante la anterior campaña de campo.

Entre la tercera y cuarta campaña realizadas en los meses de marzo y abril de 2017 (V3-V4), se puede observar al menos un evento que alcanzo una altura de ola significativa de hasta 1.5 metros de altura. De nueva cuenta se puede ver que en los cuatro primeros transectos se tuvo valores negativos, siendo el más afectado el transecto más cercano a la escollera. Los transectos 32 y del 56 al 72 mostraron ligeros avances con valores positivos siendo el transecto situado en la zona final de la zona de estudio el que obtuvo el mayor valor. En esta ocasión la zona central con los transectos 40 y 48 mostraron valores negativos, siendo el transecto 48 el que presento un valor de -1.06 metros.

Durante las campañas realizadas entre el mes de abril y mayo de 2017 (V4-V5), tuvo lugar una tormenta local conocida como turbonada, que particularmente suele suceder a principios del mes de mayo en la costa norte del estado. Este evento genero alturas de ola significativa de hasta 1.8 metros de altura. En esta ocasión se hace muy evidente el cambio en el escarpe generado por este evento climatológico pues toda la zona de estudio presento valores de retroceso de la línea de escarpe. La zona de los primeros 500 metros desde la escollera del puerto de abrigo (del transecto 1 al 24) es la que presentó la mayor afectación, con valores de hasta -4.16 metros, el mayor observado en toda la zona. En la zona central, (transectos 32 al 48), el retroceso parece estabilizarse, pero presenta valores de hasta -2.77 metros en el transecto marcado con el número 32. Para la parte final de la zona de estudio (transectos 56 al 72) son los que presentan los menores valores de erosión o retroceso debido al evento de turbonada, sin embargo, también se alcanzó un retroceso de hasta -2.60 metros en el transecto número 72.

Para las campañas entre mayo y junio de 2017 (V5-V6), se puede observar eventos característicos de la temporada de brizas la cual es predominante en la zona de estudio y que provoca vientos y oleajes alturas máximas de 1.1 metros, provenientes principalmente del NE y (Medellín et al. 2018). A pesar de que no se observan eventos de oleaje de gran

magnitud, se observó que continuo la tendencia erosiva, pues 7 de los 10 (del 24 al 72) transectos mostraron valores negativos, aunque los cambios son poco significativos si se compara con respecto a la línea de escarpe de la campaña anterior.

Entre los meses de junio, julio y agosto se realizaron las campañas de campo 6, 7 y 8 (V6-V7-V8), y se puede observar que continuaba la temporada de brizas con eventos de oleaje que apenas superaron el 1.0 metros de altura. En general se pudo observar que la línea de escarpe presento un ligero avance o recuperación en prácticamente toda la zona de estudio, la sección final de la zona de estudio en el transecto 64, fue la que presento una mayor recuperación, mientras que la sección inicial (transectos 16 al 24) y la zona media (transectos 32 al 48) mostraron una menor recuperación.

En las siguientes campañas en los meses de agosto y noviembre de 2017 (V8-V9), se observa el final de la temporada de brizas para entrar nuevamente en la temporada de nortes, pues se presentaron dos eventos con alturas de olas de más de 1.5 metros y evento con oleaje de hasta 1.8 metros justo antes de realizar la campaña de campo de noviembre. De nueva cuenta se hace evidente que la sección inicial (transectos 1 al 24) es la más sensible a los efectos de los eventos de oleaje. La sección central (transectos 32 al 48) parecen mantenerse estables y la sección final (transectos 56 al 72) presentaron un retroceso en la línea de escarpe, pero sin que estos sean de gran escala.

Finalmente, para la última campaña realizada en diciembre de 2017 (V9-V10) se observa un evento de norte con olas que alcanzaron más de 2.0 metros de altura. Los efectos de este evento climatológico se hacen evidentes, pues de los 10 transectos seleccionados, 9 mostraron valores de retroceso en la línea de escarpe a excepción del transecto 48 ubicado en la sección central de la zona de estudio. De nueva cuenta la sección con mayores cambios aquella que esta más cercana a la escollera oeste del puerto de abrigo entre los transectos 1 al 24.

Durante el tiempo que duró este estudio, se pudo observar que de manera general la zona presenta una tendencia a la erosión causada principalmente por las estructuras que conforman el puerto de abrigo de Sisal, las cuales retienen el transporte de sedimentos ocasionando una zona de acreción en la zona este y una zona de erosión en el oeste. Aunado a esto, la zona de

estudio de igual forma está expuesta eventos de nortes que contribuyen a la erosión, de igual forma los eventos de brisas que son comunes en la zona generan un transporte de este a oeste que retiene el transporte de sedimento en las estructuras del puerto de abrigo. El evento de turbonada que se presentó en mayo de 201 hizo más evidente el retroceso de la línea de escarpe que si bien mostro algunas ligeras recuperaciones, al final del tiempo que duro este estudio no pudo recuperar su posición inicial. Dentro de la zona de estudio, la sección más sensible se pude observar dentro de los 500 metros más cercanos a la escollera oeste del puerto de abrigo, mostrando los mayores valores de erosión, la sección central se comportó de manera más estable al no presentar grandes cambios después del evento de turbonada de mayo, al igual que la sección final.

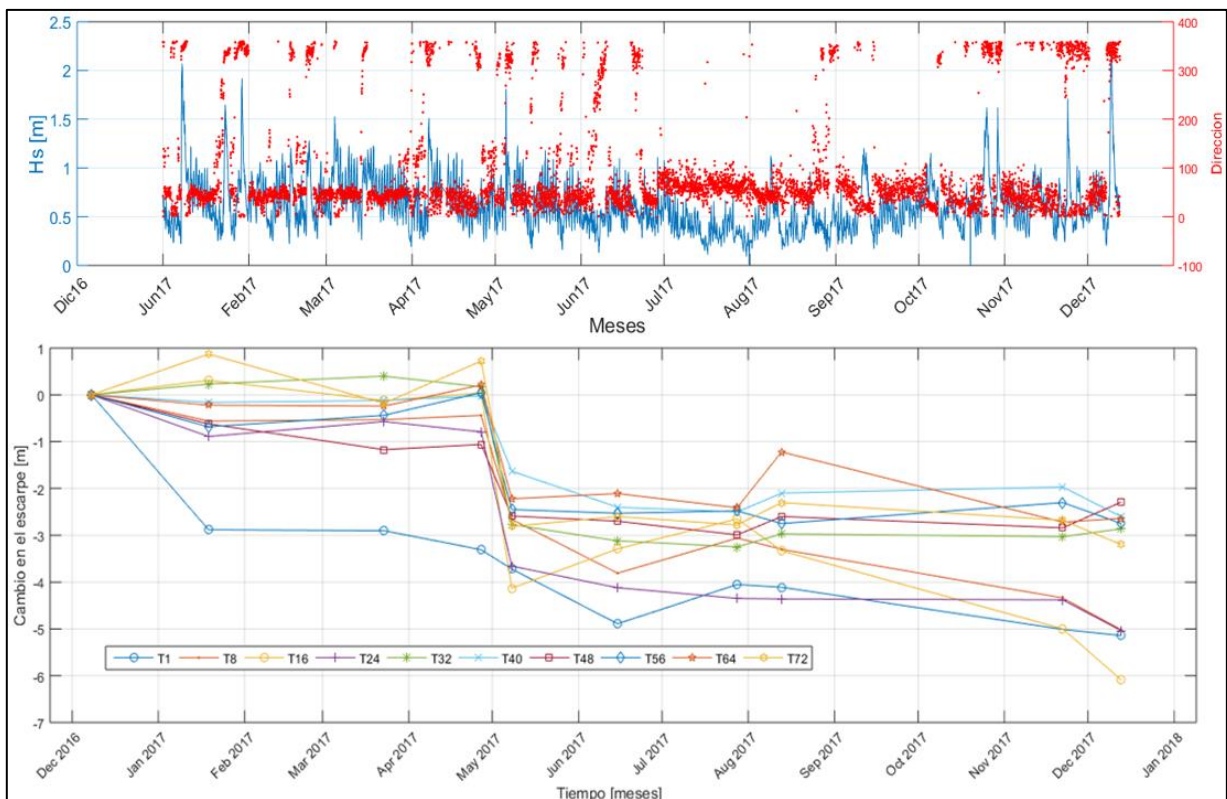


Figura 37: Cambio en la posición del escarpe a lo largo del tiempo, en la parte superior se observa la serie de oleaje, así como su altura y su dirección, en la parte inferior los cambios en el escarpe debido a los diferentes eventos que se presentaron durante el tiempo de estudio.

En la Figura 38 muestra las tasas de cambio (m/año) en la línea de escarpe durante el tiempo de estudio. Los valores que se presentan son coincidentes con los descritos y observados en la Figura 37.

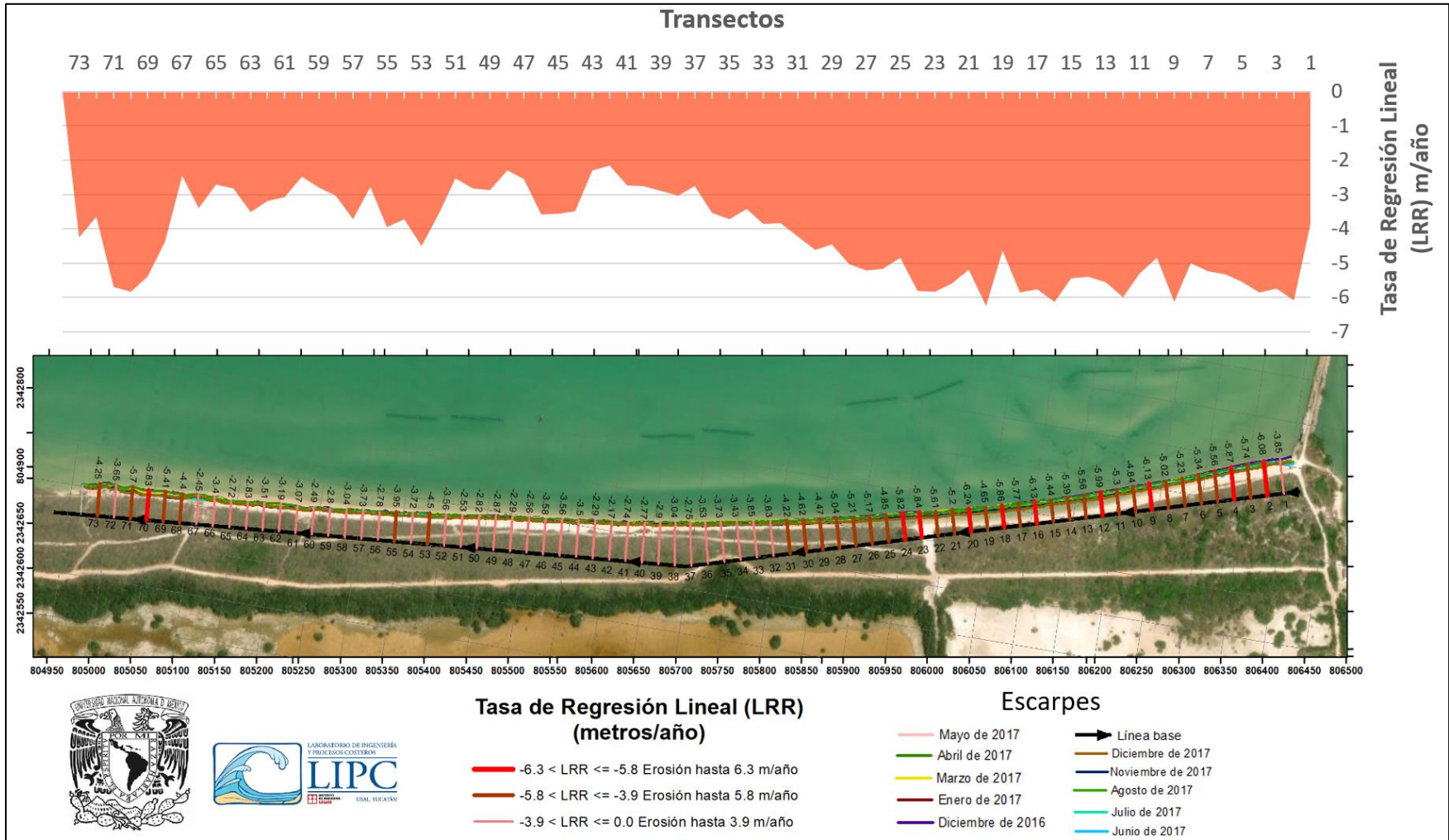


Figura 38: Cambios en la línea de costa en la zona de estudio durante el tiempo de estudio, en la parte superior se observa el cambio en la tasa de regresión lineal en la zona de estudio y en la parte inferior el cambio de la tasa de regresión lineal en cada uno de los transectos.

5 Discusión

La presencia de las estructuras que conforman el puerto de abrigo tiene una influencia notoria sobre el comportamiento de la línea de costa en la zona de estudio. El análisis realizado a partir de la técnica utilizada en este estudio y los parámetros evaluados (NSM Y LRR) presentaron valores de retroceso de playa (negativos) generalizados en ambos casos. La mayor influencia se puede observar en los primeros 500 metros de la línea de costa en la zona de estudio. En otro estudio realizado por Ruiz Beltran y Rioja-Nieto (2017) analizaron el cambio en la línea de costa, a partir de imágenes satelitales, en un periodo entre 2004 y 2014 en la costa noreste de Yucatán y encontraron valores de erosión de hasta -67.3 m.

Las rutas de vuelo creadas se traslaparon entre si con la intención de obtener mejores resultados, de igual forma se extendieron unos metros más allá del área de estudio con la intención de que los ortomosaicos y los DEM no resultaran demasiado ajustados a la hora de evaluar los resultados. Es importante revisar que las rutas creadas no ocupen una extensión de mar demasiado amplia, pues las fotos capturadas de esta zona resultan difíciles de resolver por el algoritmo Structure From Motion.

Las campañas de campo para realizar los vuelos de dron se realizaron preferentemente entre las 10 am y hasta antes de las 3 pm, con la intención de obtener las mejores condiciones climáticas tanto de viento como de temperatura. Las condiciones con viento arriba de los 35 km/h ponían en riesgo el equipo y disminuían el tiempo de vuelo y las condiciones de temperatura arriba de los 38° ocasionó que el equipo presentara algunos errores como la perdida de la conexión del dron o que las rutas no se completaran en su totalidad.

De los 10 vuelos realizados durante el tiempo de estudio, el único que presentó resultados que no cumplieron con la regla de $RMS < 2GSD$ fue el vuelo del mes de mayo. El hecho de que los resultados de la campaña del mes de mayo no hayan cumplido con la regla para la calidad de los resultados puede deberse a que varios de los puntos de control desaparecieron debido al evento climatológico que se presentó en ese mes conocido como la turbonada. Es por tanto muy importante el uso y la distribución de los puntos de control de manera uniforme en el área que se pretende estudiar.

Los ortomosaicos y DEM que se obtienen derivados de las imágenes obtenidas con los UAV utilizando el algoritmo SfM dan la posibilidad de monitorear los cambios que se presentan en una zona tan dinámica como es la zona costera. Los ortomosaicos pueden dar la posibilidad de evaluar cambios de manera visual, mientras que los DEM permiten la caracterización topográfica y en análisis del cambio planimétrico y volumétrico.

En una playa tan estrecha y con poca pendiente como la evaluada en la zona de estudio, resultó complicado definir la línea de costa con la curva de nivel $z=0$, a pesar de que se utilizaron varios métodos para extraer la línea de costa. En efecto, la mayoría de estos no arrojaron resultados adecuados para la definición de la línea de costa. Por lo tanto, se tuvo que evaluar el cambio de la costa mediante el cambio abrupto de la playa (escarpe) como un proxy de la línea de costa, lo cual arrojó una buena definición en la zona de estudio. En otros estudios donde se usaron los UAVs para cuantificar el cambio de la línea de costa, como el realizado por Lowe et al. (2019) en las islas Salomón en Malasia, se obtuvo la línea de costa usando como identificador el límite de vegetación a partir de los ortomosaicos obtenidos, sin embargo el mismo autor admite que, obtener la línea de costa de esta forma, puede influir en la clasificación de una línea de costa como erosionada, acumulada o estable.

Si bien utilizar el escarpe resulta ser un indicador o “proxy” de la línea de costa, a partir del cual se han cuantificado el cambio de la costa en la zona de estudio, la definición elegida de línea de costa se debe a su naturaleza dinámica, debe considerar aspectos temporales, espaciales y tomar en cuenta la dependencia de esta variabilidad en la escala de tiempo en la que se está investigando. Por lo tanto, para propósitos prácticos, la definición elegida es de menor importancia que la capacidad de cuantificar los cambios en la costa con el indicador elegido. El desafío resulta entonces en desarrollar una técnica que sea lo suficientemente robusta y con carácter repetible para determinar la “línea de costa” con el indicador elegido en la zona de estudio con la fuente de datos disponibles. Boak y Turner (2005), mencionan que un indicador de costa es una característica que se utiliza como “proxy” para representar la posición “verdadera” de la costa y enumeran un total de 45 indicadores a partir de los cuales se puede cuantificar cambios dentro de una zona costera. En este estudio, el escarpe utilizado para cuantificar los cambios en la zona de estudio, resultó ser el indicador o “proxy” que se pudo obtener a partir de los modelos digital de elevación.

En la comparativa realizada de los resultados que se obtienen usando las técnicas tradicionales para el seguimiento de la línea de costa como el DGPS vs los resultados usando la técnica empleada en este estudio, los valores de determinación R^2 oscilaron entre 0.885 (el transecto tres) y 0.975 (en el transecto cuatro). El menor valor observado de 0.885 se presenta en el transecto tres, aunque los perfiles presentan una buena similitud. En general la comparativa de los cuatro transectos presento un valor de $R^2 = 0.912$ lo cual es aceptable para este estudio.

En mayo y julio de 2019 fueron instaladas en la zona de estudio, unas estructuras de protección costera conocidas como reef balls. (Franklin et al. 2021), realizó su investigación posterior a la instalación de estas estructuras y observó un retroceso generalizado del ancho de la playa, con un valor promedio de -1.5 m y un máximo de -10.1 m. Sin embargo, en la sección medía, observó valores positivos o de aumento del ancho de la playa con un valor promedio de 5.7 m y un máximo de 10.7 m. coincidiendo este aumento del ancho de la playa con la instalación de las estructuras antes mencionadas.

Este estudio se realizó previo cualquier intervención realizada en la zona y se observaron valores negativos que representan una erosión o retroceso generalizada del ancho de playa atribuido principalmente a la presencia de las estructuras que conforman el puerto de abrigo de Sisal, cuya influencia en la zona de estudio generan un proceso de erosión crónica, en algunas ocasiones el ancho de línea de costa presentó recuperación del ancho de la playa sin lograr recuperarse a su estado inicial durante la primera campaña de campo en diciembre de 2016. Los eventos de nortes, los eventos de brisas que se presentan en la zona, así como eventos extraordinarios como la turbonada en el mes de mayo son de igual forma causas que contribuyen erosión que se presenta en la zona.

La erosión que se presenta en la zona de estudio es coincidente con las tendencias globales de erosión que se presentan en gran parte de las zonas costeras del mundo debido a los cambios generados por el calentamiento global y las grandes actividades antropogénicas que en estas se presentan.

Si bien el uso de los vehículos aéreos no tripulados puede tener algunas limitantes debido a las condiciones del viento. Su repetibilidad, el uso reducido de recursos humanos y la

posibilidad de abarcar grandes extensiones en un menor tiempo hacen que la técnica utilizada sea una buena opción para el monitoreo y seguimiento de la línea de costa.

6 Conclusiones

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos durante este trabajo, podemos observar las aportaciones que se generan con el uso de la metodología utilizada para evaluar el cambio de la línea de costa. Este trabajo ha aportado información del uso de los vehículos aéreos no tripulados en combinación con los sistemas de información geográfica para ser una opción aceptable para dar seguimiento a los cambios que se presentan en la línea de costa.

De los 73 transectos evaluados y que abarcan los 1,460 metros de longitud de la zona de estudio, los 73 presentaron valores negativos, es decir durante el periodo en que se realizó el estudio se observó un retroceso o erosión generalizada.

El parámetro de Movimiento Neto de la Costa presento un valor máximo de 6.71 metros de retroceso o erosión.

El parámetro de Tasa de Regresión Lineal presento un valor máximo de 6.24 m/año de retroceso o erosión.

El mayor retroceso general observado durante el periodo de estudio se presentó entre los meses de abril y mayo, siendo este cambio generado por el evento climatológico presentado en el mes de mayo conocido como turbonada.

La influencia de las estructuras que conforman el puerto de abrigo sobre la línea de costa demostró ser mayor en los primeros 600 metros en donde se puede observar que los parámetros MSN y LRR alcanzaron sus valores máximos.

El uso de los vehículos aéreos no tripulados en combinación con los sistemas de información geográfica demostró ser una opción que debe considerarse para realizar el monitoreo y seguimiento de los cambios en la línea de costa.

La comparativa realizada entre el uso de los UVA vs los DGPS presentó un valor general de determinación $R^2 = 0.912$

Sigue siendo imprescindible el uso de los puntos de control terrestre para ayudar a obtener resultados cuya precisión pueda ser aceptable en comparación con las técnicas tradicionales de seguimiento y monitoreo de la línea de costa como el uso de los DGPS.

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ofrecen potencialmente varias ventajas para monitorear los cambios en la costa. La toma repetida de datos de alta resolución para la obtención de ortomosaicos y DEM es factible y rentable. En consecuencia, los UAV se han convertido en una herramienta notoria para administradores de tierras, topógrafos investigadores e ingenieros costeros.

7 Referencias

- Appendini, C.M.; Salles, P.; Mendoza, E.T.; López, J., and Torres-Freyermuth, A., 2012. Longshore sediment transport on the northern coast of the Yucatan Peninsula.
- Barrera Ceballos, Manuel Arturo. 2001. “Deformación En La Línea de 1 Kilómetro de Playa Comprendido Entre Las Comisariás de Chelem Puerto y Chuburna Puerto.” Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Belfiore, S et al. 2004. “Indicadores Para La Gestión Integrada y El Desarrollo Sostenible de Las Zonas Costeras:” *El Manejo Costero en Mexico*: 654.
<http://etzna.uacam.mx/epomex/pdf/mancos/cap5.pdf>.
- Birdseye, Claude H. 1940. “Stereoscopic Phototopographic Mapping.” *Annals of the Association of American Geographers* 30(1): 1–24.
- Boak, Elizabeth H., and Ian L. Turner. 2005. “Shoreline Definition and Detection: A Review.” *Journal of Coastal Research* 21(4): 688–703.
- Clark, A. 2017. “Small Unmanned Aerial Systems Comparative Analysis for the Application to Coastal Erosion Monitoring.” *GeoResJ* 13: 175–85.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.grj.2017.05.001>.
- I. Colomina; M. Blázquez; P. Molina; M.E. Parés; M. Wis; 2008. “Towards A New Paradigm for High-Resolution Low-Cost Photogrammetry and Remote Sensing.” *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXXVII*: 1201.
http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/205.pdf.
- “Cómo Funciona Pendiente—Ayuda | ArcGIS for Desktop.”
https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm#ESRI_SECTION1_3092513D12BB4C5D91FD590CBF5FC240 (August 26, 2020).
- DIGAOHM. 2006. “El Sisal, Yucatán.”
- DJI. 2016. “Phantom 4.” <https://www.dji.com/es/phantom-4> (December 5, 2018).
- Eisenbeiss, Henri. 2011. “The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping.” : 135–45.
- Elmoustapha, Ahmed Ould, Franck Levoy, Olivier Monfort, and Vladimir G. Koutitonsky. 2007. “A Numerical Forecast of Shoreline Evolution after Harbour Construction in Nouakchott, Mauritania.” *Journal of Coastal Research* 23(6): 1409–17.
- Figueroa-Espinoza, Bernardo, Paulo Salles, and Jorge Zavala-Hidalgo. 2014. “On the Wind Power Potential in the Northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico.” *Atmosfera* 27(1): 77–89.
- Claude Flener; Matti Vaaja; Anttoni Jaakkola; Anssi Krooks; Harri Kaartinen; Antero Kukko; Elina Kasvi; Hannu Hyypä; Juha Hyypä; Petteri Alho, 2013. “Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography.” *Remote Sensing* 5(12): 6382–6407.

- Gemma L. Franklin; Gabriela Medellín; Christian M. Appendini; Juan A. Gómez; Alec Torres-Freyermuth; José López González; Pablo Ruiz-Salcines, 2021. “Impact of Port Development on the Northern Yucatan Peninsula Coastline.” *Regional Studies in Marine Science* 45: 101835. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101835>.
- Gulyaev, S A. 2004. “Terrestrial Methods for Monitoring Cliff Erosion in an Urban Environment.” *Journal of Coastal Research* 20(3): 871–78.
- Harwin, Steve, and Arko Lucieer. 2012. “Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery.” *Remote Sensing* 4(6): 1573–99.
- J. A. Herrera-Silveira; I. Medina-Gómez; N. Aranda-Cirerol; A. Zaldivar; J. Ramírez; J. Trejo, 2002. “Trophic Status in Coastal Waters of the Yucatan Peninsula (SE , Mexico) Using Water Quality Indicators.”
- Himmelstoss, E.A. 2009. “DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide.” *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278* 1278: 291–94. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/>.
- Himmelstoss, Emily A., Rachel E. Henderson, Meredith G. Kratzmann, and Amy S. Farris. 2018. “Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide.” *U.S. Geological Survey Open-File Report Open-File Report 2018-1179*: 126.
- Hugenholtz, Chris H., Noam Levin, Thomas E. Barchyn, and Matthew C. Baddock. 2012. “Remote Sensing and Spatial Analysis of Aeolian Sand Dunes: A Review and Outlook.” *Earth-Science Reviews* 111(3–4): 319–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.006>.
- Jiang, Jianlin, Loo Hay Lee, Ek Peng Chew, and Chee Chun Gan. 2015. “Port Connectivity Study: An Analysis Framework from a Global Container Liner Shipping Network Perspective.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 73: 47–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.10.012>.
- F. E. Jonah, I. Boateng, A. Osman, M. J. Shimba, E. A. Mensah, K. Adu-Boahen, E. O. Chuku, E. Effah, 2016. “Shoreline Change Analysis Using End Point Rate and Net Shoreline Movement Statistics: An Application to Elmina, Cape Coast and Moree Section of Ghana’s Coast.” *Regional Studies in Marine Science* 7: 19–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2016.05.003>.
- LANRESC. 2018. *ESTUDIO INTEGRAL DE RESTAURACIÓN Y ESTABILIZACIÓN COSTERA DEL ESTADO DE YUCATÁN*.
- Lee, Jeong-Min, Jun-Yong Park, and Jin-Yong Choi. 2013. “Evaluation of Sub-Aerial Topographic Surveying Techniques Using Total Station and RTK-GPS for Applications in Macrotidal Sand Beach Environment.” *Journal of Coastal Research* 65: 535–40.
- Meagan K. Lowe, Farrah Anis Fazliatul Adnan, Sarah M. Hamylton, Rafael C. Carvalho, Colin D. Woodroffe, 2019. “Assessing Reef-Island Shoreline Change Using UAV-Derived Orthomosaics and Digital Surface Models.” *Drones* 3(2): 1–19.

- Lu, Wen, Sung Hoon Park, Jae Gyuen Oh, and Gi Tae Yeo. 2018. "Network Connection Strategy for Small and Medium-Sized Ports (SMPs)." *Asian Journal of Shipping and Logistics* 34(1): 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ajsl.2018.03.003>.
- Francesco Mancini, Marco Dubbini, Mario Gattelli, Francesco Stecchi, Stefano Fabbri, Giovanni Gabbianelli, 2013. "Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments." *Remote Sensing* 5(12): 6880–98.
- Gabriela Medellín, Alec Torres-Freyermuth, Giuseppe Roberto Tomasicchio, Antonio Francone, Peter A. Tereszkievicz, Letizia Lusito, Leonardo Palemón-Arcos, José López, 2018. "Field and Numerical Study of Resistance and Resilience on a Sea Breeze Dominated Beach in Yucatan (Mexico)." *Water (Switzerland)* 10(12).
- Mohamed A. K. Elsayed, Sameh M Mahmoud. 2007. "Groins System for Shoreline Stabilization on the East Side of the Rosetta Promontory, Nile Delta Coast." *Journal of Coastal Research* 23(2): 380–87. <http://www.jstor.org/stable/4494206>.
- Pratap K. Mohanty, Shraban K. Barik, Prabin K. Kar, Balaji Behera, Pravakar Mishra, 2015. "Impacts of Ports on Shoreline Change along Odisha Coast." *Procedia Engineering* 116(1): 647–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.339>.
- Robert J Nicholls, Poh Poh Wong, V.R Burkett, J.O Codignotto, J.E Hay, R.F McLean, S Ragoonaden, C.D Woodroffe, 2007. "Coastal Systems and Low-Lying Areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof." *Assessment* (20): 315–56. <http://ro.uow.edu.au/scipapers/164/>.
- Ismail Hakki Özölçer, Murat Ihsan Kömürçü, Ali Remzi Birben, Ömer Yüksek, Servet Karasu, 2006. "Effects of T-Shape Groin Parameters on Beach Accretion." *Ocean Engineering* 33(3–4): 382–403.
- Pajares, Gonzalo, and Jesús M. de la Cruz. 2001. X. RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones. <https://books.google.com.mx/books?id=2y7hAQAACAAJ>.
- Pix4D.com. "Ground Sampling Distance (GSD) – Support." <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809> (January 15, 2019).
- Pix4D S.A. 2017. "USER MANUAL Pix4Dmapper 4.1." : 305p. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/sections/360003718992-Manual>.
- "Pix4Dcapture: Free Drone Flight Planning Mobile App. | Pix4D." <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture> (December 5, 2018).
- F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. Sarazzi, 2012. "Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives." *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/(June 2014)*: 25–31. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/25/2011/>.
- Ruiz Beltran, Ana Patricia, and R. Rioja-Nieto. 2017. "VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE

COSTA DEL NOROESTE DE YUCATÁN EN EL PERIODO 2004-2014.”
(February).

- Birute Ruzgiene, Tautvydas Berteška, Silvija Gečyte, Edita Jakubauskiene, Vladislovas Česlovas Aksamitauskas, 2015. “The Surface Modelling Based on UAV Photogrammetry and Qualitative Estimation.” *Measurement* 73: 619–27.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224115002316>.
- Santoyo Palacios, Alejandra Berenice. 2017. “Esobozo Monográfico de Sisal.” : 119.
- SCT. 2009. “Programa Maestro de Desarrollo de Puertos Puerto Progreso y Puertos Pesqueros de Yucatán.” 39(5): 561–63.
- . 2016. “SCT Puertos Y Marina.” *Puertos Y Marina, puertos, catastro*.
<http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos/catastro/>.
- Syvitski, James P M, Charles J. Vörösmarty, Albert J. Kettner, and Pamela Green. 2005. “Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean.” *Science* 308(5720): 376–80.
- Alec Torres-Freyermuth, Jack A. Puleo, Nick DiCosmo, Ma Eugenia Allende-Arandía, Patricia Chardón-Maldonado, José López, Bernardo Figueroa-Espinoza, Amaia Ruiz de Alegria-Arzaburu, Jens Figlus, Tiffany M. Roberts Briggs, Jacobo de la Roza, Julio Candela, 2017. “Nearshore Circulation on a Sea Breeze Dominated Beach during Intense Wind Events.” *Continental Shelf Research* 151(August): 40–52.
- . 2019. “Morphodynamic Response to Low-Crested Detached Breakwaters on a Sea Breeze-Dominated Coast.” *Water (Switzerland)* 11(4).
- Valverde, Jorge. 2007. “Detección de Bordes Mediante El Algoritmo de Canny.” *ResearchGate* (December): 8. <http://www.seccperu.org/files/Detecci?ndeBordes-Canny.pdf>.
- Watts, Adam C., Vincent G. Ambrosia, and Everett A. Hinkley. 2012. “Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use.” *Remote Sensing* 4(6): 1671–92.
- Zhang, Wangfei, Jianguo Gao, Tianshu Xu, and Yanru Huang. 2009. “The Selection of Ground Control Points in a Remote Sensing Image Correction Based on Weighted Voronoi Diagram.” *Proceedings - 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science, ITCS 2009* 2(1850): 326–29.

8 Anexos

8.1 DEM y ortofotos

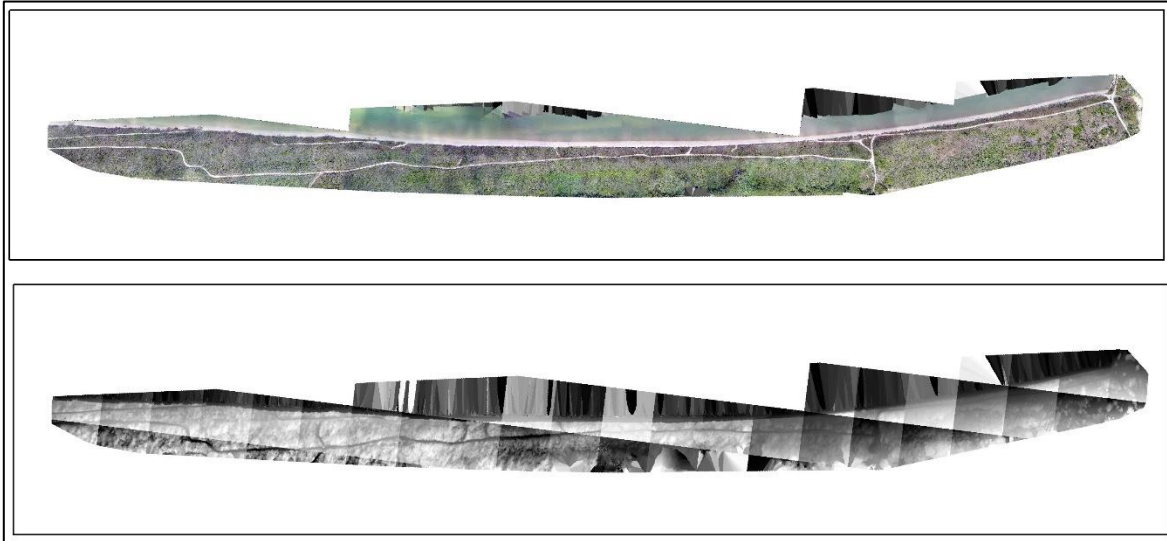


Figura 39: DEM y ortofoto del mes de enero de 2017

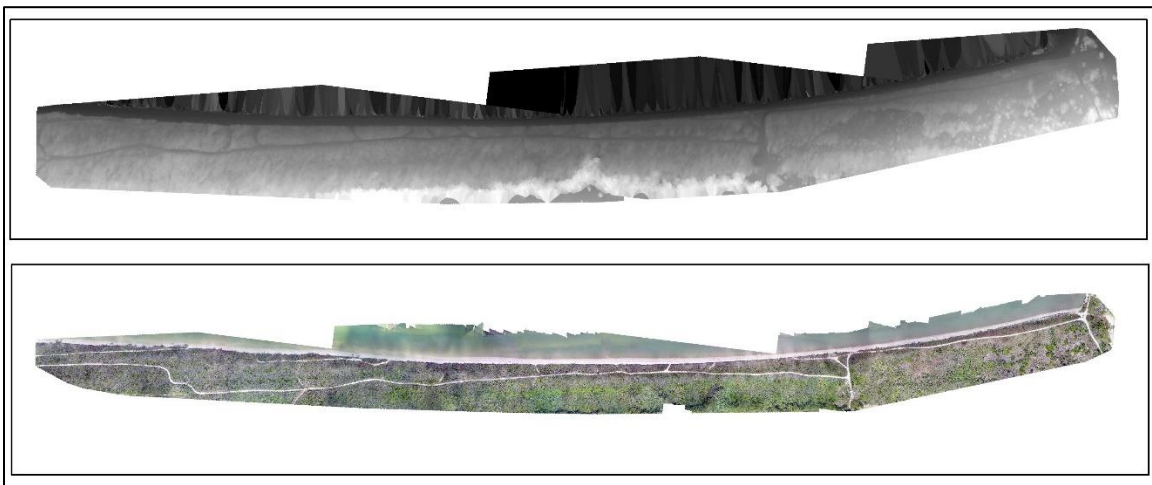


Figura 40: DEM y ortofoto del mes de enero de 2017

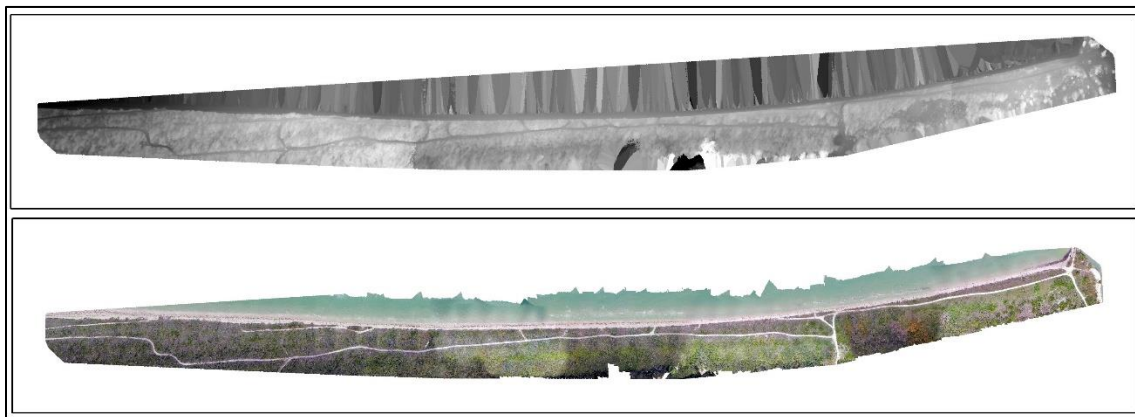


Figura 41: DEM y ortofoto del mes de marzo de 2017

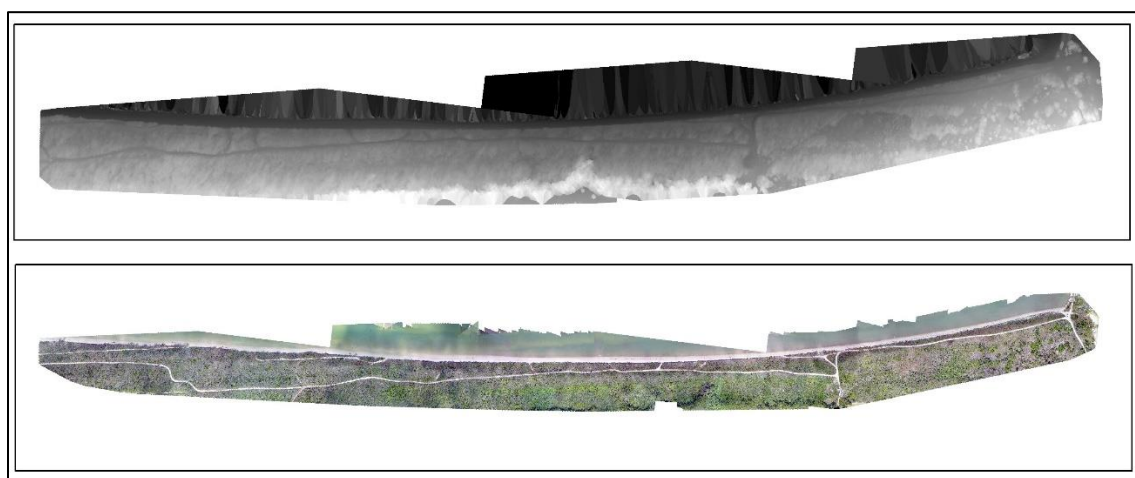


Figura 42: DEM y ortofoto del mes de abril 2017

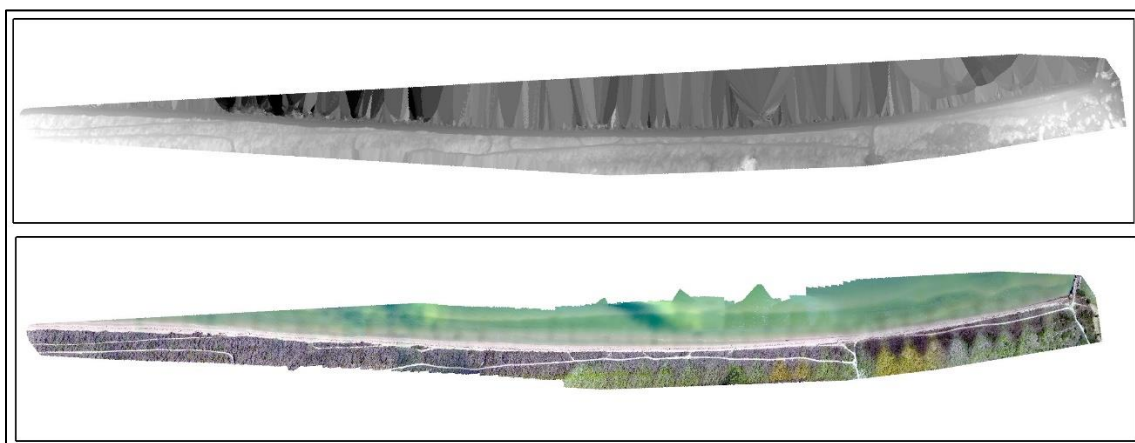


Figura 43: DEM y ortofoto del mes de mayo 2017

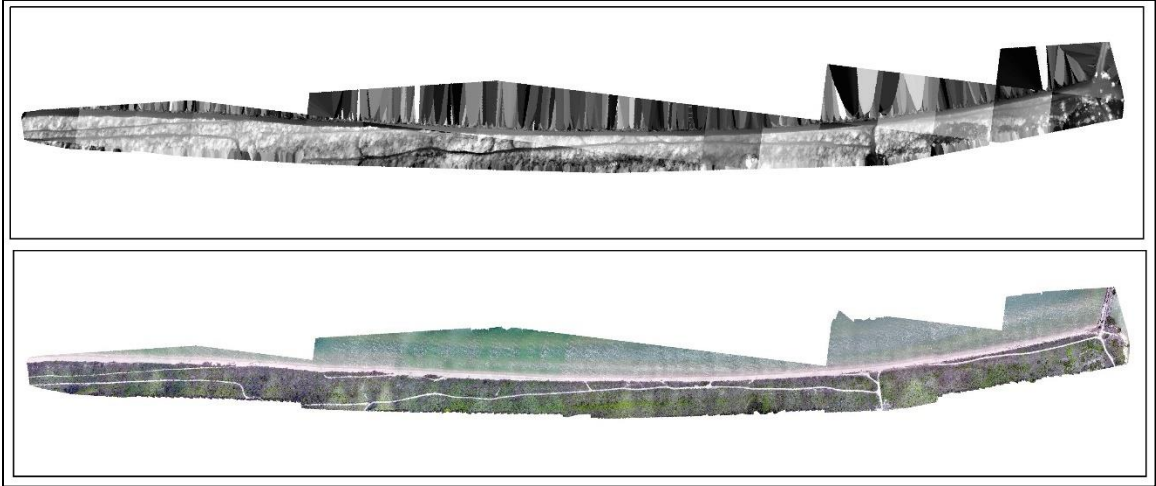


Figura 44: DEM y ortofoto del mes de junio 2017

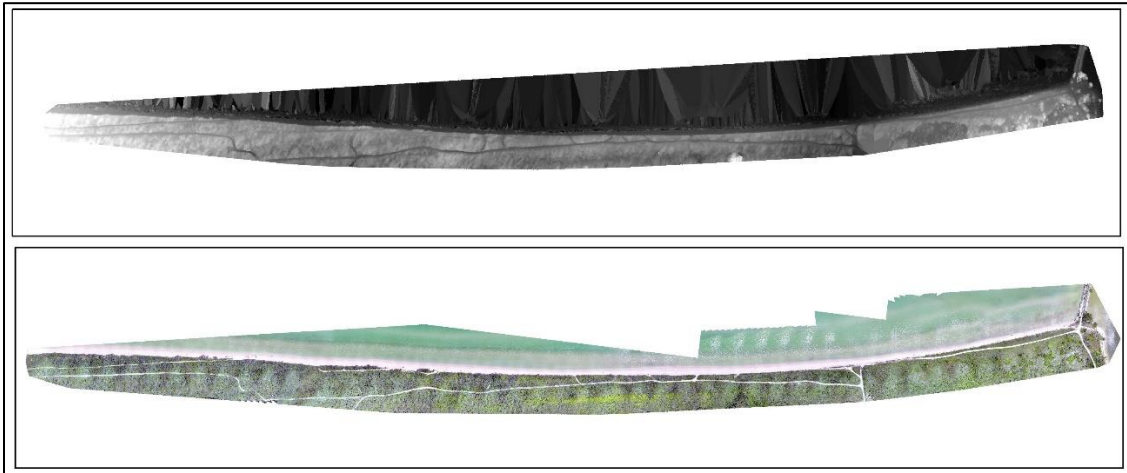


Figura 45: DEM y ortofoto del mes de julio 2017

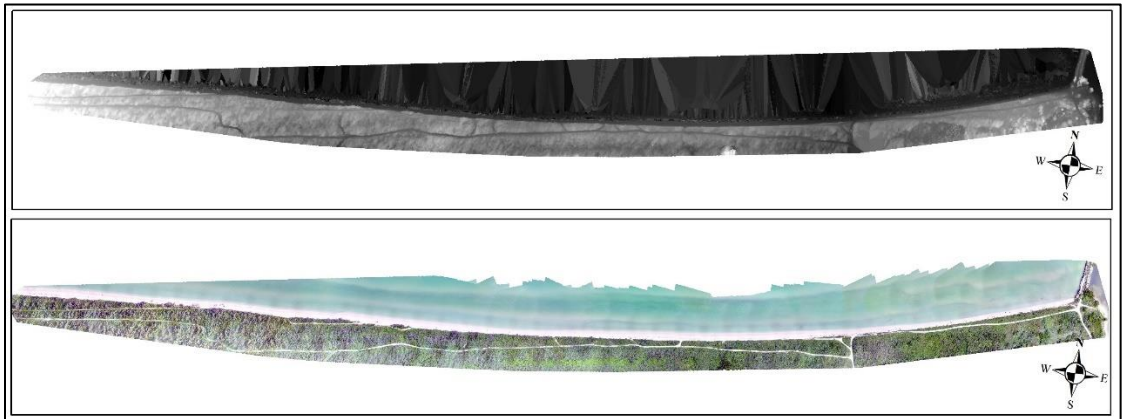


Figura 46: DEM y ortofoto del mes de agosto 2017

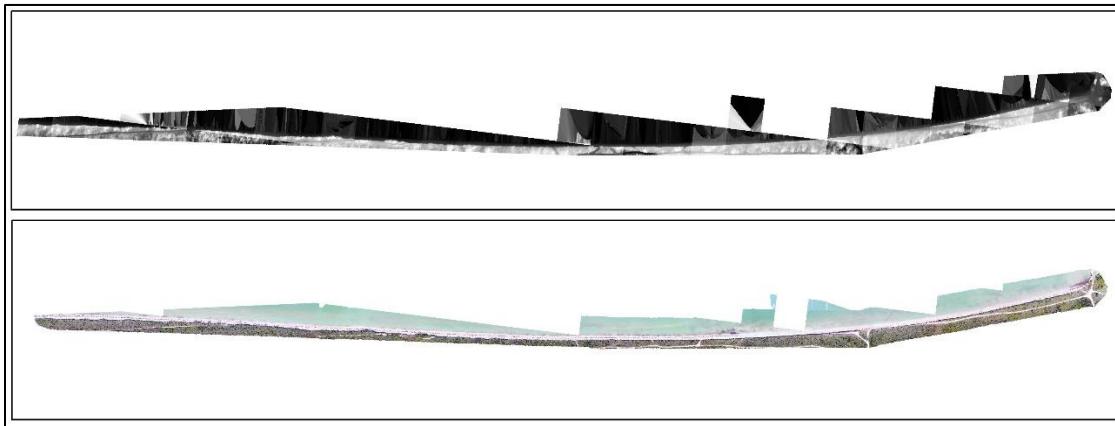



Figura 47: DEM y ortofoto del mes de diciembre de 2017

8.2 Anexo 2 Reportes de calidad Pix4D

Summary i		
Project	palmar diciembre 2016	
Processed	2017-02-11 20:47:38	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.82 cm / 0.71 in	
Area Covered	0.2789 km ² / 27.8883 ha / 0.1077 sq. mi. / 68.9492 acres	
Quality Check i		
? Images	median of 41659 keypoints per image	✔
? Dataset	1468 out of 1540 images calibrated (96%), all images enabled, 2 blocks	⚠
? Camera Optimization	2.91% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
? Matching	median of 1227.86 matches per calibrated image	✔
? Georeferencing	yes, 16 GCPs (7 3D), mean RMS error = 0.019 m	✔

Figura 48: Reporte de calidad del mes de diciembre de 2016

Summary		
Project	palmar enero	
Processed	2017-02-14 04:36:15	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.09 cm / 0.82 in	
Area Covered	0.2687 km ² / 26.8693 ha / 0.1038 sq. mi. / 66.4298 acres	













Quality Check		
 Images	median of 47302 keypoints per image	
 Dataset	1519 out of 1519 images calibrated (96%), all images enabled	
 Camera Optimization	2.48% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 6394.84 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 16 GCPs (16 3D), mean RMS error = 0.011 m	

Figura 49: Reporte de calidad del mes de enero de 2017

Summary		
Project	palmar marzo	
Processed	2017-08-26 18:28:04	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.75 cm / 0.69 in	
Area Covered	0.2705 km ² / 27.0471 ha / 0.1045 sq. mi. / 66.8695 acres	












Quality Check		
 Images	median of 2433 keypoints per image	
 Dataset	1747 out of 1783 images calibrated (97%), all images enabled, 3 blocks	
 Camera Optimization	0.43% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 653.357 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 15 GCPs (15 3D), mean RMS error = 0.009 m	

Figura 50: Reporte de calidad del mes de marzo de 2017













Summary		
Project	palmar abril	
Processed	2017-08-28 09:37:16	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.87 cm / 0.73 in	
Area Covered	0.2687 km ² / 26.8693 ha / 0.1038 sq. mi. / 66.4298 acres	
Quality Check		
 Images	median of 2541 keypoints per image	
 Dataset	1827 out of 1896 images calibrated (96%), all images enabled	
 Camera Optimization	2.96% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 819.287 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 13 GCPs (13 3D), mean RMS error = 0.011 m	

Figura 51: Reporte de calidad del mes de abril de 2017














Summary		
Project	palmar mayo	
Processed	2017-08-20 10:00:50	
Camera Model Name(s)	FC300X_3.6_4000x3000 (RGB), FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.24 cm / 0.88 in	
Area Covered	0.3142 km ² / 31.4236 ha / 0.1214 sq. mi. / 77.6897 acres	
Quality Check		
 Images	median of 3236 keypoints per image	
 Dataset	1449 out of 1535 images calibrated (94%), all images enabled	
 Camera Optimization	2.69% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 483.27 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 14 GCPs (14 3D), mean RMS error = 0.113 m	

Figura 52: Reporte de calidad del mes de mayo de 2017

Summary		
Project	palmar junio	
Processed	2017-08-13 23:07:57	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.25 cm / 0.88 in	
Area Covered	0.3275 km ² / 32.7526 ha / 0.1265 sq. mi. / 80.9754 acres	













Quality Check		
 Images	median of 28706 keypoints per image	
 Dataset	1677 out of 1803 images calibrated (93%), all images enabled	
 Camera Optimization	3.14% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 5222.26 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 15 GCPs (15 3D), mean RMS error = 0.008 m	

Figura 53: Reporte de calidad del mes de junio de 2017

Summary		
Project	palmar julio	
Processed	2017-08-18 23:16:22	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.45 cm / 0.96 in	
Area Covered	0.3596 km ² / 35.9619 ha / 0.1389 sq. mi. / 88.9097 acres	












Quality Check		
 Images	median of 2769 keypoints per image	
 Dataset	1565 out of 1835 images calibrated (85%), all images enabled	
 Camera Optimization	3.52% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 285.929 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 14 GCPs (14 3D), mean RMS error = 0.041 m	

Figura 54: Reporte de calidad del mes de julio de 2017

Summary i		
Project	palmar agosto	
Processed	2017-09-09 22:47:43	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.35 cm / 0.92 in	
Area Covered	0.3278 km ² / 32.7848 ha / 0.1266 sq. mi. / 81.0549 acres	

Quality Check i		
Images	median of 2817 keypoints per image	
Dataset	1623 out of 1918 images calibrated (84%), all images enabled	
Camera Optimization	2.83% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 438.981 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 16 GCPs (16 3D), mean RMS error = 0.019 m	

Figura 55: Reporte de calidad del mes de agosto de 2017

Summary i		
Project	palmar noviembre	
Processed	2018-12-02 12:58:21	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.19 cm / 0.47 in	
Area Covered	0.1527 km ² / 15.2666 ha / 0.059 sq. mi. / 37.744 acres	
Time for Initial Processing (without report)	07m:35s	

Quality Check i		
Images	median of 2972 keypoints per image	
Dataset	1395 out of 1533 images calibrated (91%), all images enabled, 2 blocks	
Camera Optimization	14.56% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 276.297 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 24 GCPs (24 3D), mean RMS error = 0.007 m	

Figura 56: Reporte de calidad del mes de noviembre de 2017

Summary		
Project	palmar diciembre 2017 AR	
Processed	2018-01-09 22:11:31	
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)	
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.26 cm / 0.49 in	
Area Covered	0.3278 km ² / 32.7848 ha / 0.1266 sq. mi. / 81.0549 acres	

Quality Check		
Images	median of 23068 keypoints per image	✓
Dataset	1540 out of 1540 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.32 % relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 5603.91 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 20 GCPs (20 3D), mean RMS error = 0.006 m	✓

Figura 57: Reporte de calidad del mes de noviembre de 2017