



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



AGENCIA
ESTATAL DE
INVESTIGACIÓN



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

V Seminario “Mejora del conocimiento de los hábitats terrestres y costeros con apoyo de las nuevas tecnologías”

Estimación de batimetría somera mediante Sentinel-2: lecciones aprendidas

Isabel Caballero de Frutos

ICMAN
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

BATIMETRÍA: ESENCIAL PARA RESPALDAR LAS ACTIVIDADES COSTERAS, PARA SU GESTIÓN, PRESERVACIÓN Y PARA COMPRENDER EL **IMPACTO DEL CAMBIO GLOBAL** EN LA COSTA

“LA BATIMETRÍA SOMERA ES EL PARÁMETRO MÁS SENSIBLE EN LOS MODELOS DE INUNDACIÓN Y DE EROSIÓN COSTERA”

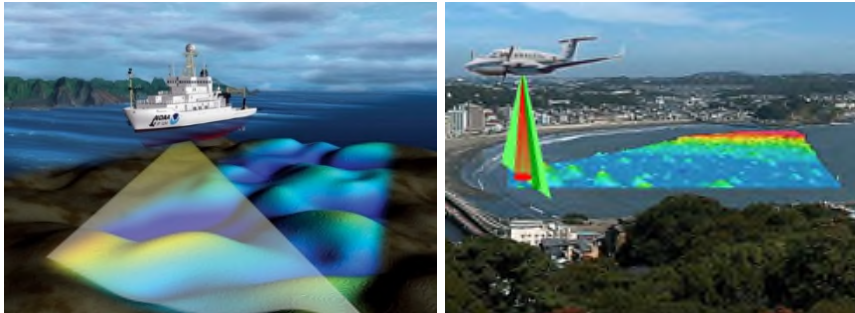
70% FONDO MARINO COSTERO SIN CARTOGRAFIAR

**“WHITE RIBBON”
ORGANIZACIÓN HIDROGRÁFICA
INTERNACIONAL**

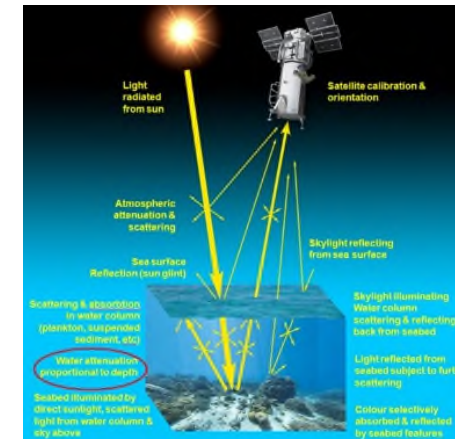
¿CÓMO SOLUCIONAR ESTE RETO EN EL S. XXI?

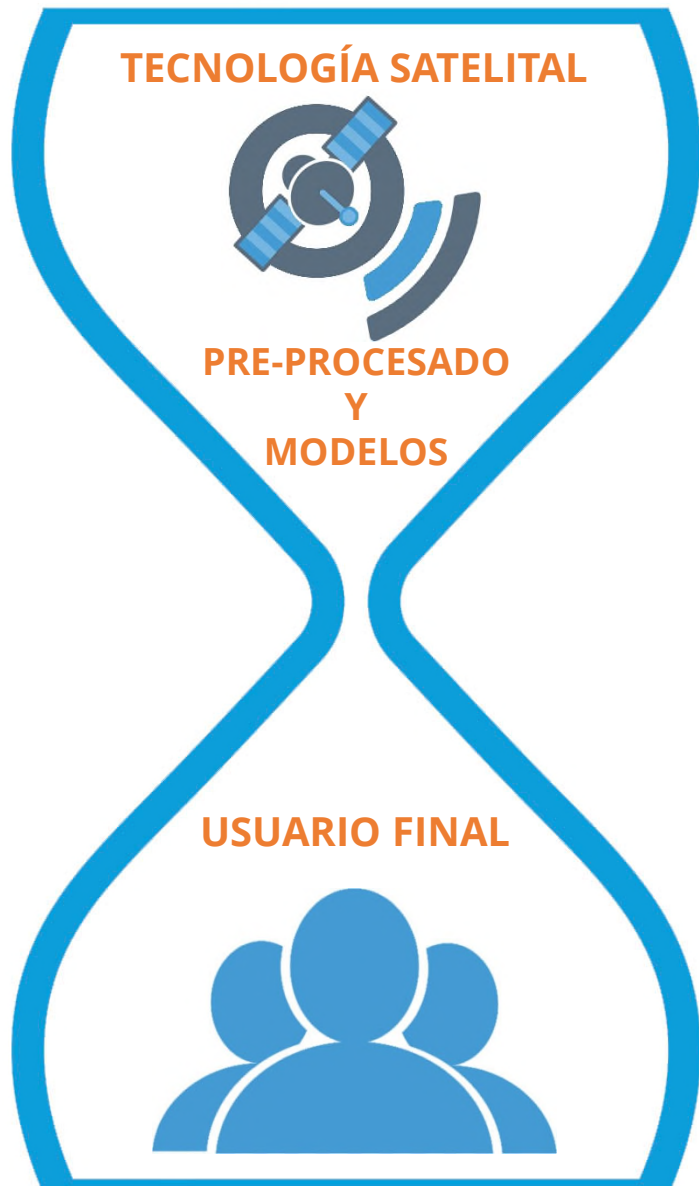
SISTEMAS TRADICIONALES DE MUESTREO

Técnicas precisas pero extremadamente costosas y limitadas logísticamente por el acceso a zonas someras o remotas

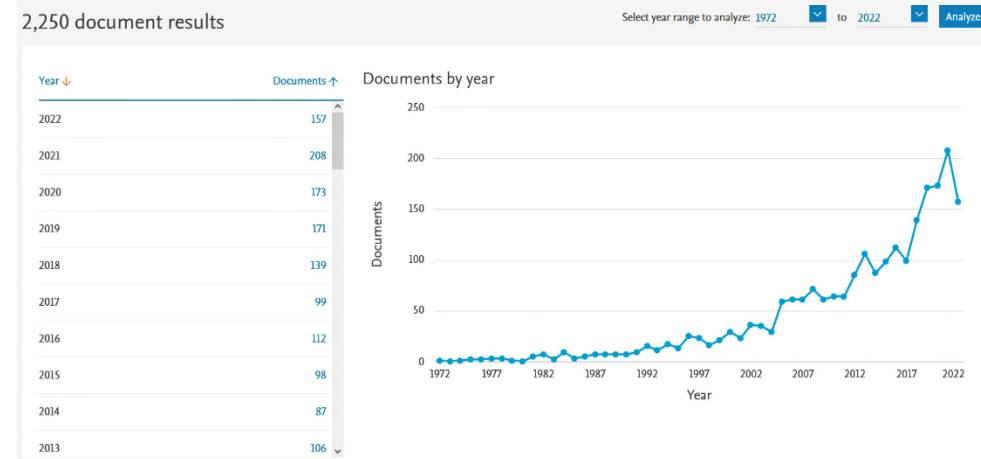


BATIMETRÍA DERIVADA DE SATÉLITE SATELLITE-DERIVED BATHYMETRY (SDB)





NUMEROSOS MODELOS DE SDB

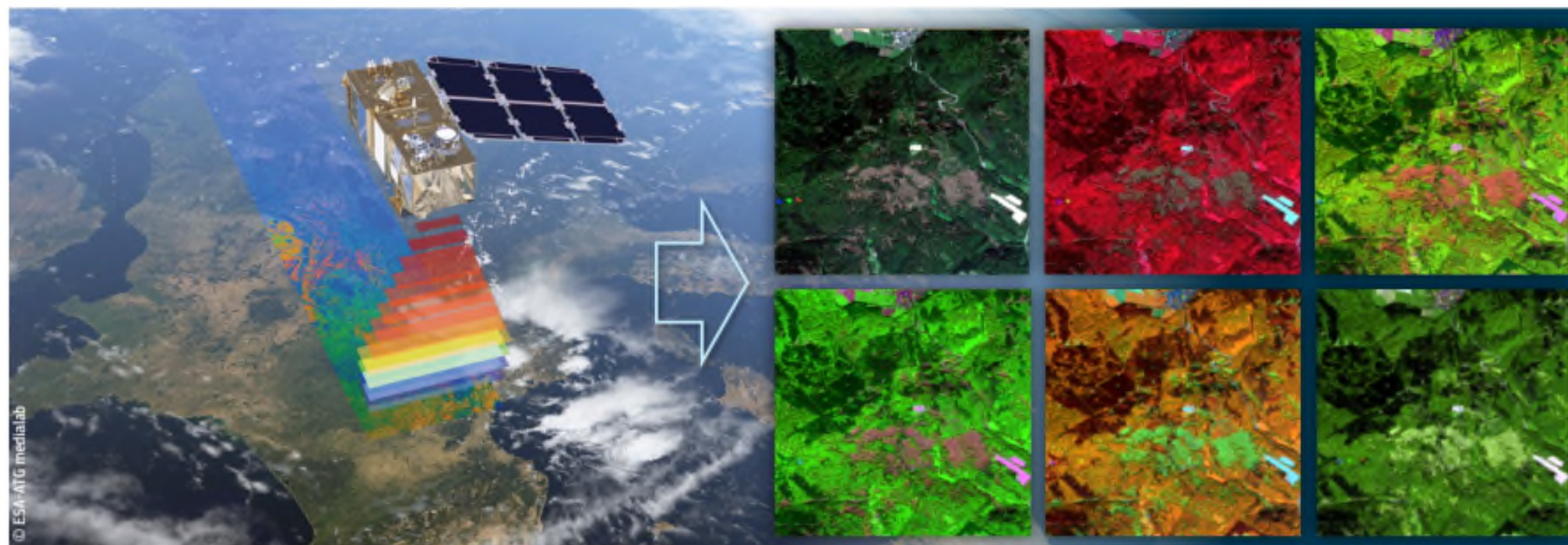
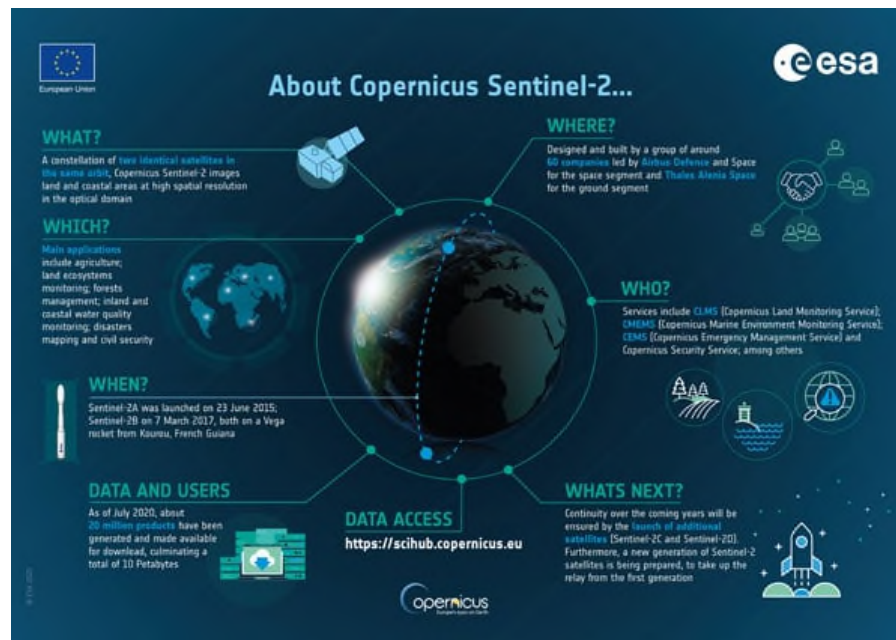


**NINGÚN MODELO SDB ES UTILIZADO
OPERACIONALMENTE POR USUARIOS FINALES
¿POR QUÉ?**

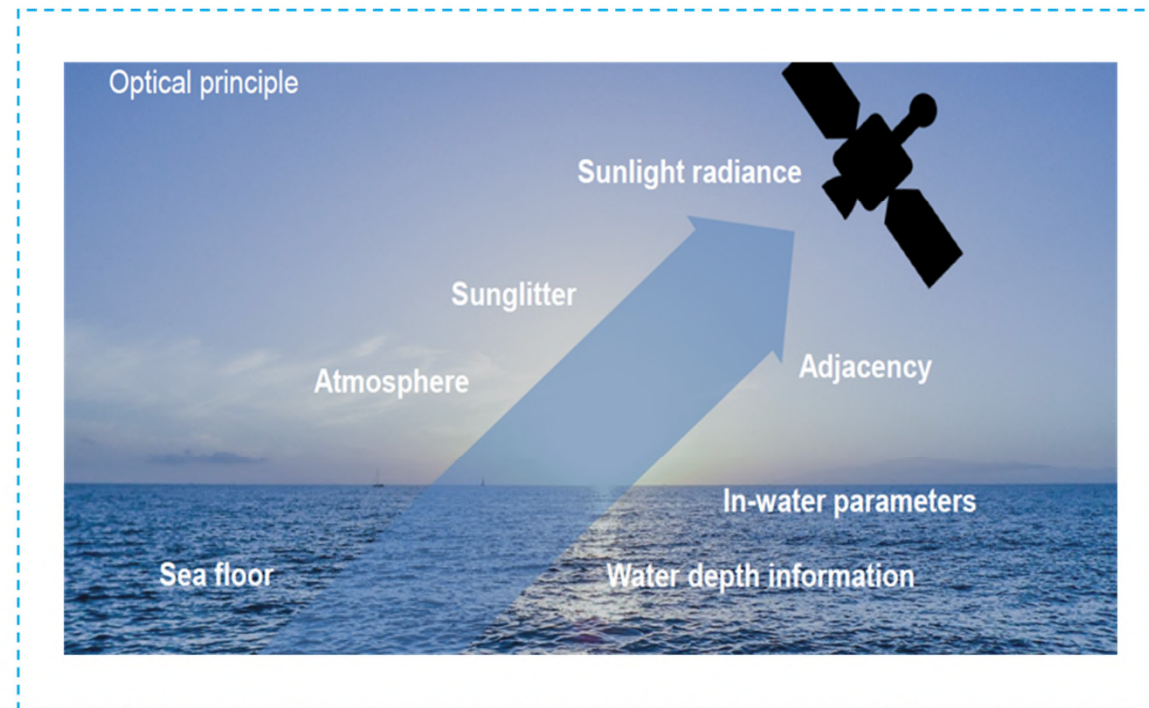
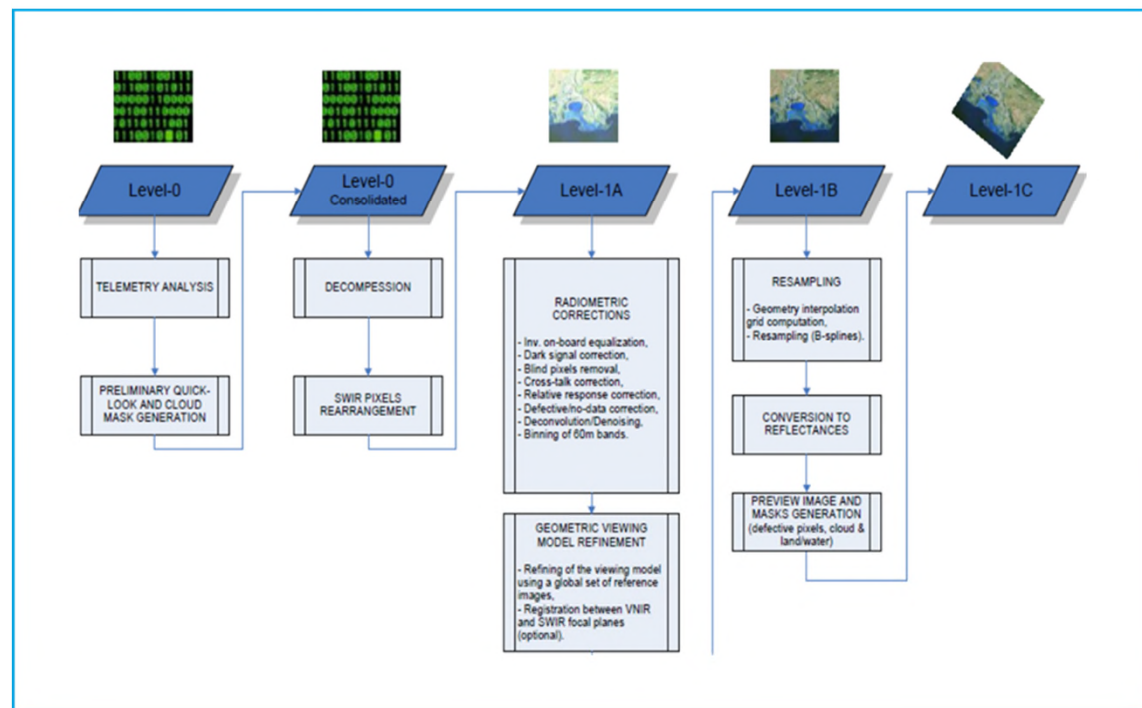


DESAFÍO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

**IA: EL
ACTIVO
OB PARA
S COMO
O
OBAL**



PRE-PROCESAMIENTO: 90% DE LA SEÑAL QUE LE LLEGA AL SATÉLITE ES RUIDO
(NO PROVENIENTE DEL AGUA)



SUNGLINT O REFLEJO DEL SOL

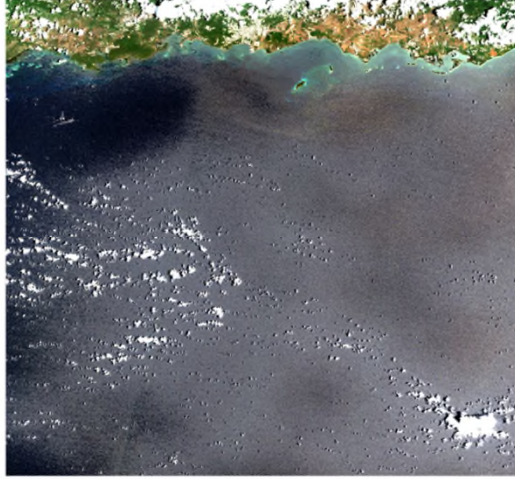
CÁDIZ

PUERTO RICO

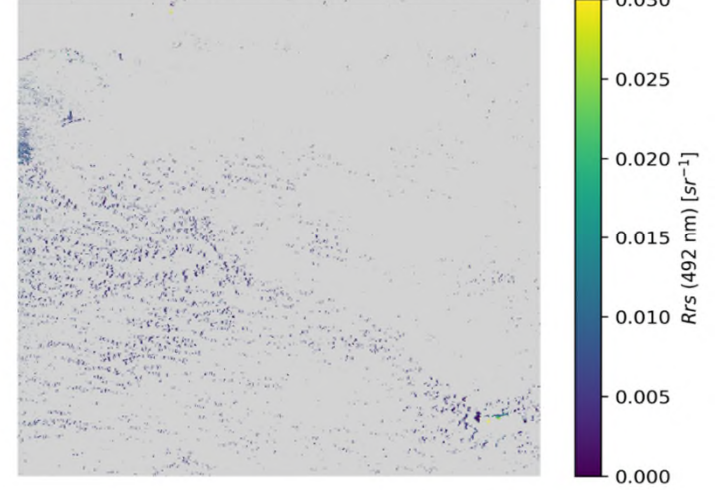
ρ_t RGB S2A/MSI 2018-08-21 (15:07 UTC)



ρ_s RGB S2A/MSI 2018-08-21 (15:07 UTC)



Rrs (492 nm) S2A/MSI 2018-08-21 (15:07 UTC)



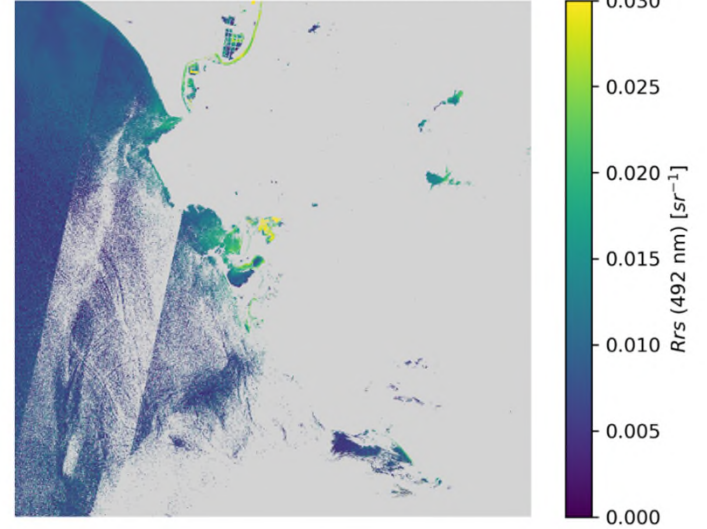
ρ_t RGB S2A/MSI 2021-06-30 (11:21 UTC)



ρ_s RGB S2A/MSI 2021-06-30 (11:21 UTC)

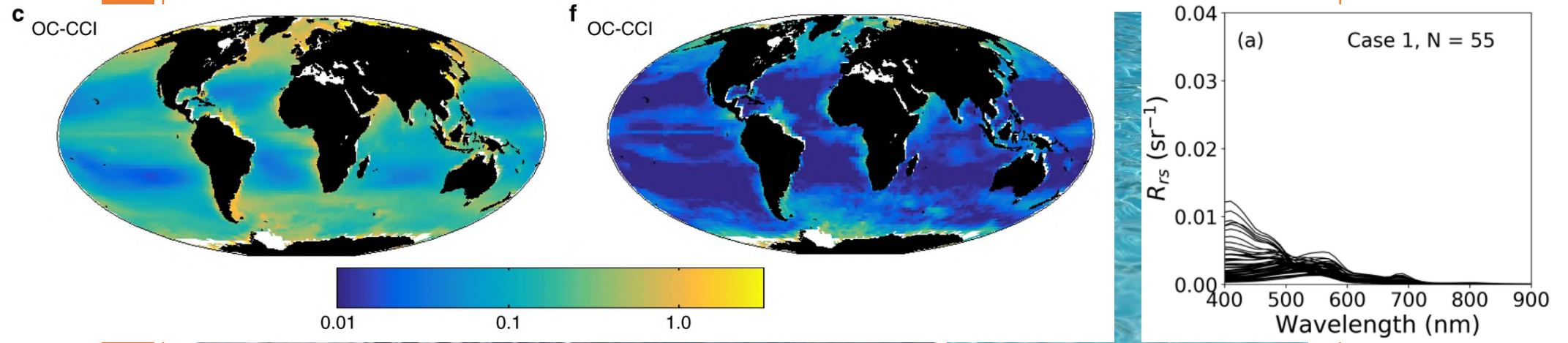


Rrs (492 nm) S2A/MSI 2021-06-30 (11:21 UTC)

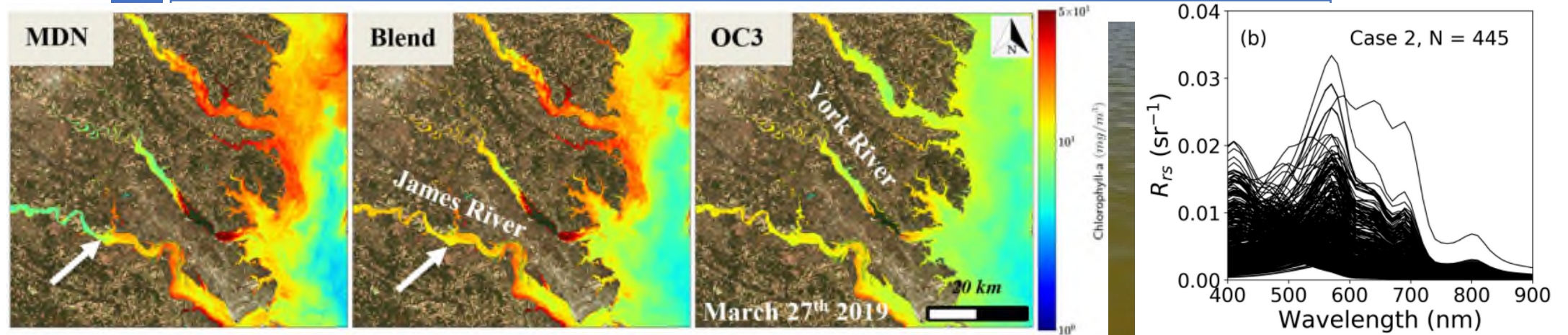


ALGORITMOS Y MODELOS DERIVADOS DE SATÉLITE

AGUAS DE CASO 1



AGUAS DE CASO 2



NUEVA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN LA NOAA: CARTOGRAFIADO REMOTO DEL FONDO COSTERO

METODOLOGÍA AUTOMÁTICA DE PRE-PROCESAMIENTO Y NUEVOS ALGORITMOS SDB CON LOS SATÉLITES SENTINEL-2
EL ELEMENTO MÁS INNOVADOR Y RELEVANTE ES QUE LOS MODELOS MULTI-TEMPORALES DESARROLLADOS **MEJORAN**
SIGNIFICATIVAMENTE LOS RESULTADOS DONDE EXISTE TURBIDEZ, 80% DE LA FRANJA COSTERA MUNDIAL

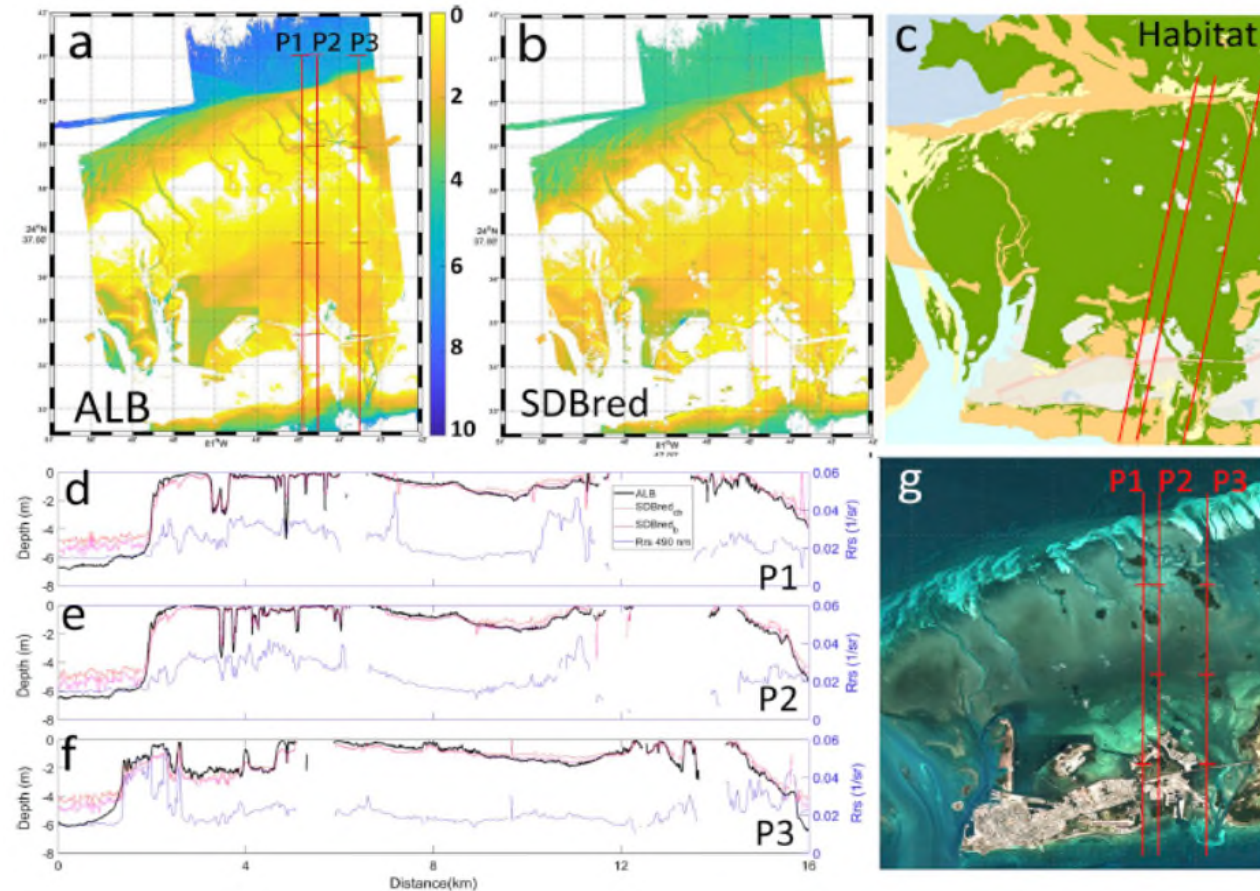
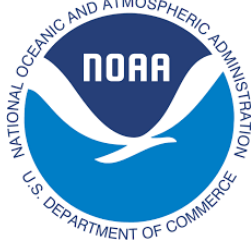


IP PROYECTOS INTERNACIONALES



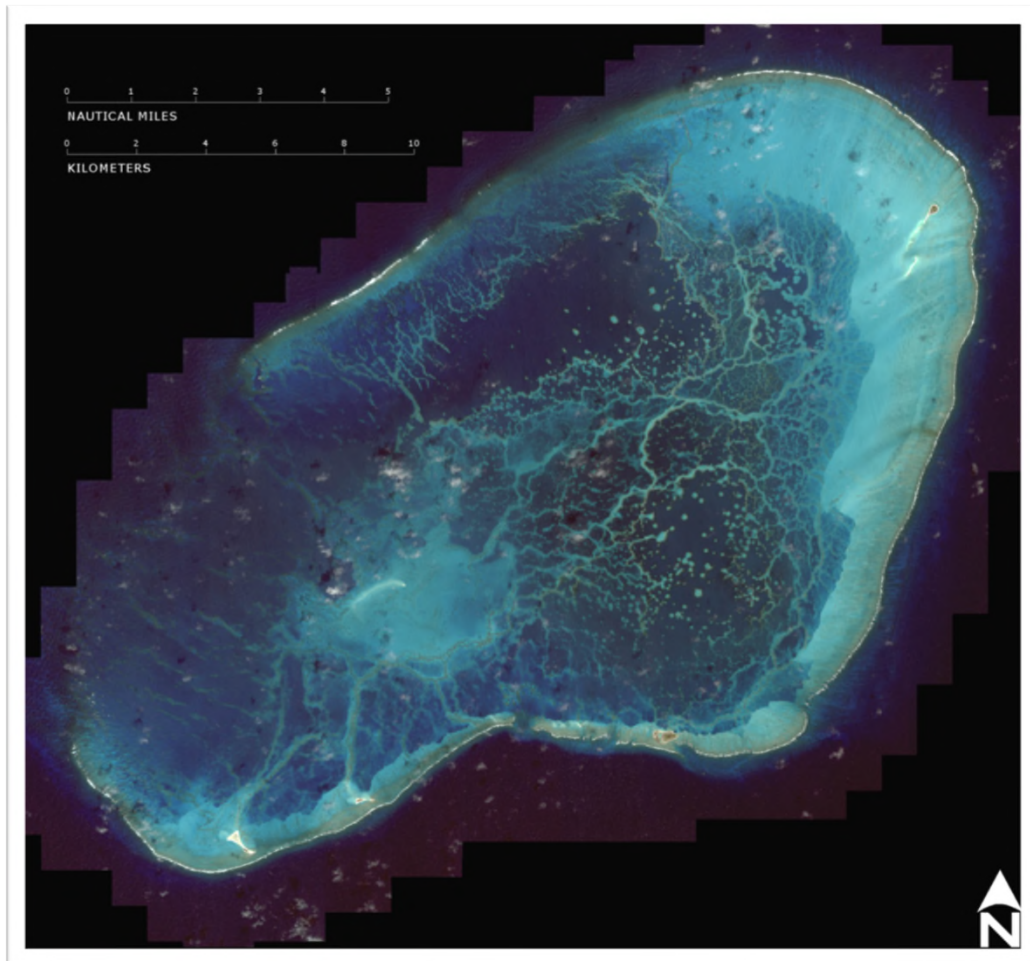
PREMIO DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y
MEDICINA EE. UU.

ASSESSMENT OF SENTINEL-2 AND SENTINEL-3
MULTISPECTRAL SATELLITES FOR ADVANCEMENT OF
COASTAL APPLICATIONS IN USA NAS2017RP798



El **objetivo principal** consiste en el desarrollo de una metodología completa y efectiva para la generación de mapas batimétricos someros basada en técnicas de teledetección mediante el uso de los satélites de alta resolución espacial Sentinel-2, incorporando una corrección automática combinada de los efectos ambientales, atmosféricos y acuáticos.

Aguas transparentes



Variabilidad espacio-temporal de la turbidez (material en suspensión)



mayoría de ambientes costeros

Algoritmo automatizado de múltiples escenas: identificación y corrección de la turbidez



IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2



Imagen 3



pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez

Algoritmo automatizado de múltiples escenas: identificación y corrección de la turbidez



IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2



Imagen 3

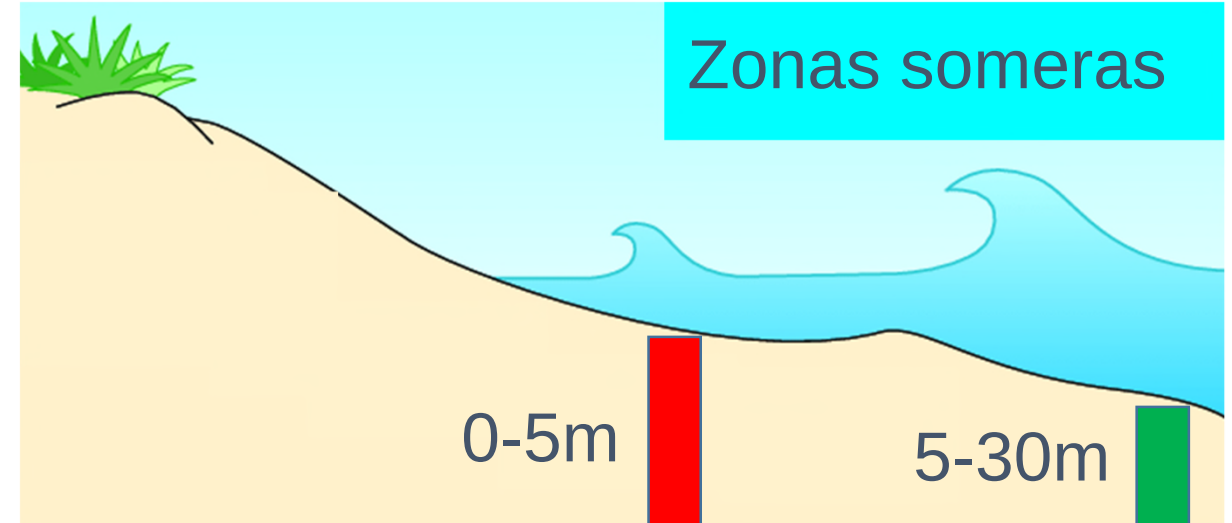


pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez



$$SDBred(m) = m1 \left(\frac{\ln(n \pi \text{ Banda azul})}{\ln(n \pi \text{ Banda red})} \right) - m0$$

$$SDBgreen(m) = m1 \left(\frac{\ln(n \pi \text{ Banda azul})}{\ln(n \pi \text{ Banda verde})} \right) - m0$$



IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2

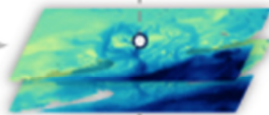


Imagen 3



pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



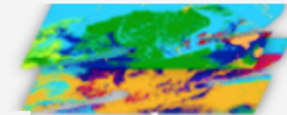
n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez

SDB MULTI-TEMPORAL

Productos finales SDB sin calibrar

pseudoSDBred
pseudoSDBgreen





IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



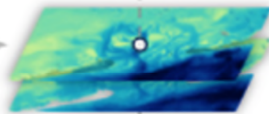
pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2



Imagen 3



pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



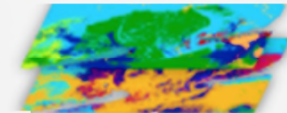
n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez

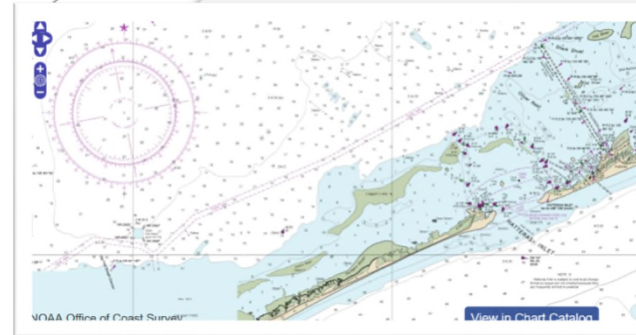
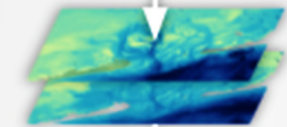
SDB MULTI-TEMPORAL

Productos finales SDB sin calibrar

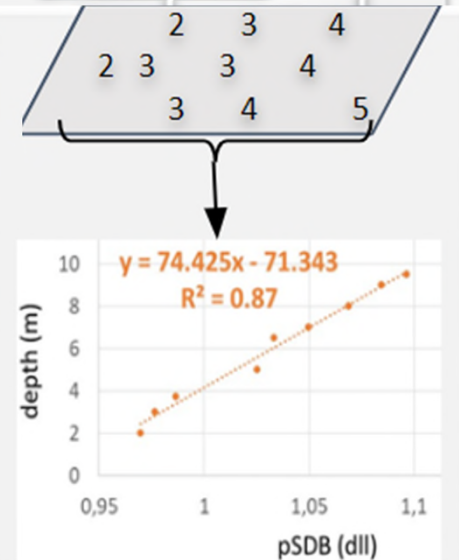
pseudoSDBred
pseudoSDBgreen



Calibración (charts)



10-15 puntos de
control





IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2

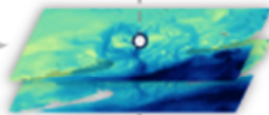


Imagen 3



pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



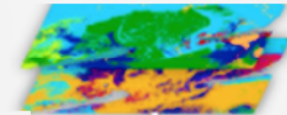
n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez

SDB MULTI-TEMPORAL

Productos finales SDB sin calibrar

pseudoSDBred
pseudoSDBgreen



Calibración (charts)



Algoritmo de
conmutación



Si $SDBred < 2$ m, $SDBfinal = SDBred$;

Si $SDBred > 2$ m y $SDBgreen > 3.5$ m, $SDBfinal = SDBgreen$;

Si $SDBred \geq 2$ m y $SDBgreen \leq 3.5$ m, $SDBfinal = SDBweighted$.

Donde la profundidad de ponderación, $SDBweighted$, se calcula mediante la ponderación lineal para tener en cuenta la transición suave entre ambos modelos (Ecuación 3):

$$SDBweighted = \alpha * SDBred + \beta * SDBgreen$$

$$\alpha = \frac{3.5 - SDBred}{3.5 - 2} \text{ y } \beta = 1 - \alpha$$



IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



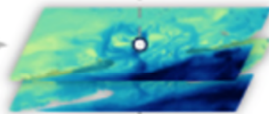
pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2



Imagen 3



pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



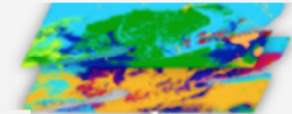
n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez

SDB MULTI-TEMPORAL

Productos finales SDB sin calibrar

pseudoSDBred
pseudoSDBgreen



Calibración (charts)



Algoritmo de
conmutación

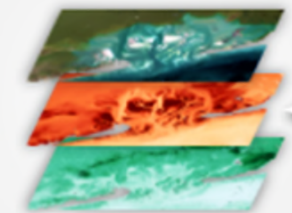


Productos finales

Mapa SDB

Mapa turbidez

Mapa incertidumbre





IMÁGENES SENTINEL-2A/B

ACOLITE

Corrección atmosférica + sunglint

Imagen 1



pseudoSDBred1
pseudoSDBgreen1



Imagen 2



pseudoSDBred2
pseudoSDBgreen2

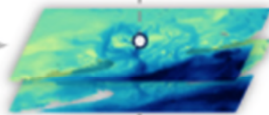


Imagen 3



pseudoSDBred3
pseudoSDBgreen3



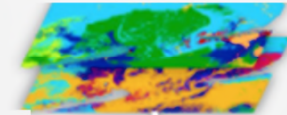
n escenas

Algoritmo multi-escena para la
corrección automática de la turbidez

SDB MULTI-TEMPORAL

Productos finales SDB sin calibrar

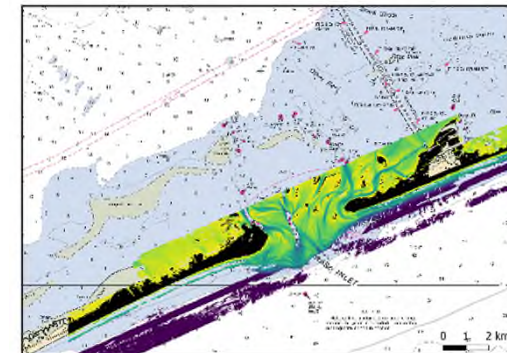
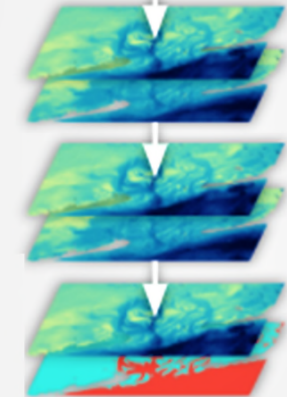
pseudoSDBred
pseudoSDBgreen



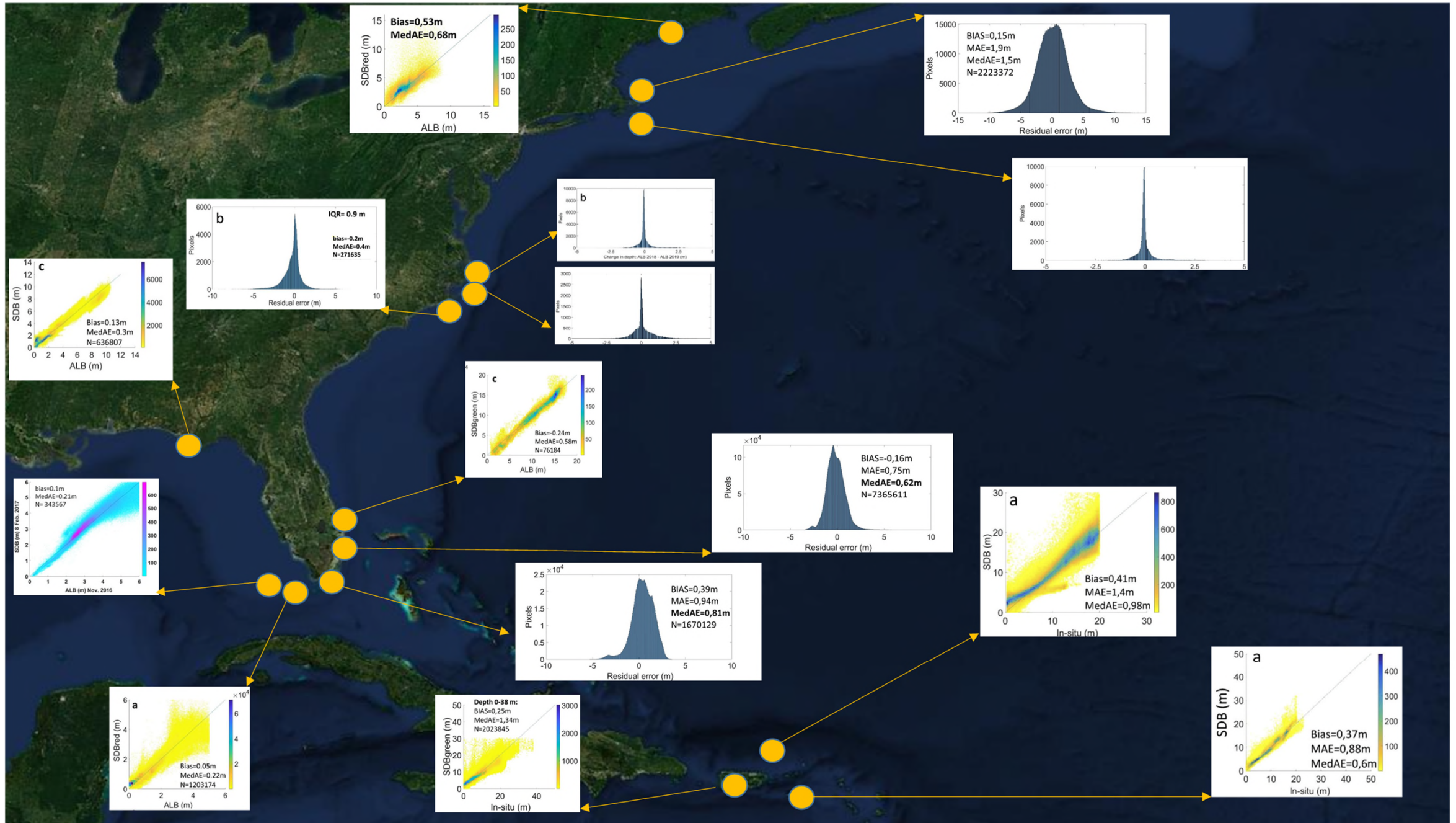
Calibración (charts)

Algoritmo de
conmutación

Validación (lidar)



Áreas de control y validación



➤ La metodología es consistente y precisa

Resolución 10 m
Profundidades 0-30 m
Errores medios < 0.5-1m
Bias < 0.5m

➤ Se obtuvieron resultados comparables en regiones como El Caribe, con aguas transparentes, y Nueva Inglaterra, la costa más compleja y turbia del país.

Área piloto	Año	Bias (m)	MedAE (m)	N (píxeles)	Profundidades (m)	Artículo científico publicado
Buck	2018	0.19	0.60	93210	0-22	Caballero y Stumpf, 2020a
Culebra	2018	0.41	0.98	79225	0-20	Caballero y Stumpf, 2020a
Puerto Rico	2018	0.25	1.34	2023845	0-30	No publicado
Dry Tortugas	2017	-0.15	0.22	419306	0-6	Caballero y Stumpf, 2019
Cayo Hueso	2016	0.05	0.22	1203174	0-6	Caballero y Stumpf, 2019; Caballero et al., 2019
Miami	2019	-0.16	0.62	7365611	0-25	No publicado
West Palm Beach	2016	0.04	0.45	78741	0-18	Caballero y Stumpf, 2019
Joseph Bay	2017	0.10	0.30	636807	0-12	Caballero y Stumpf, 2020b
Cape Lookout	2017	-0.20	0.40	271635	0-13	Caballero y Stumpf, 2020b
Hatteras	2019	0.27	0.41	107044	0-7	No publicado

➤ La metodología es consistente y precisa

Resolución 10 m
Profundidades 0-30 m
Errores medios < 0.5-1m
Bias < 0.5m



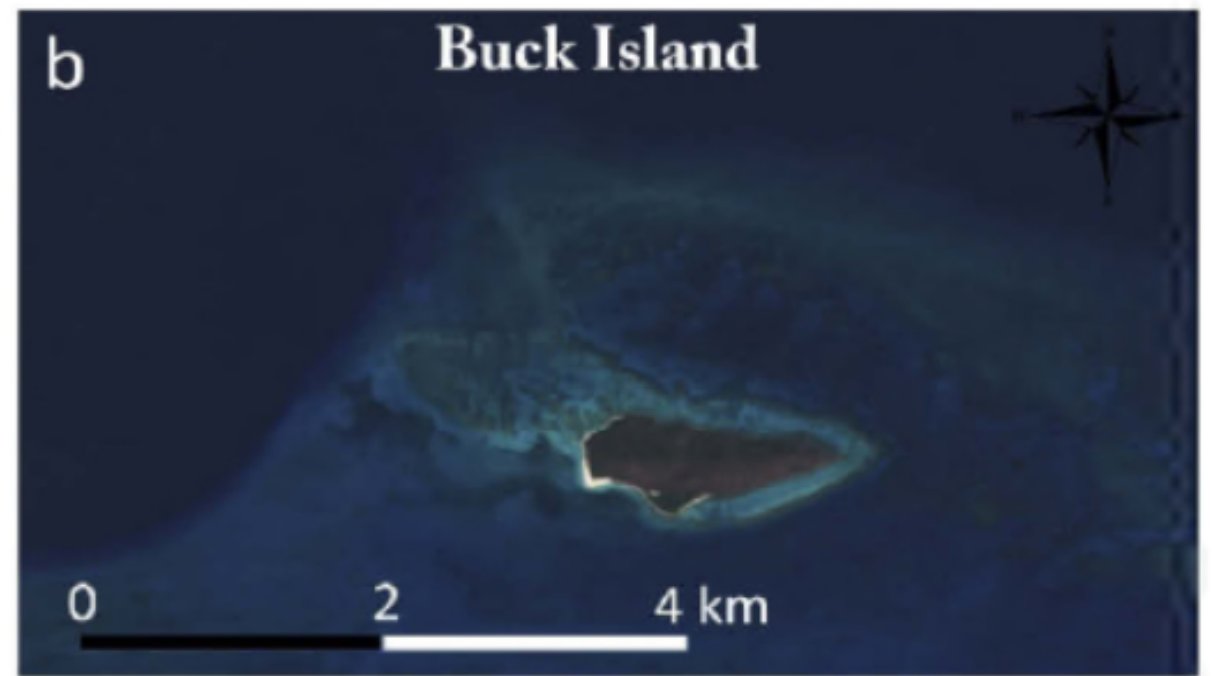
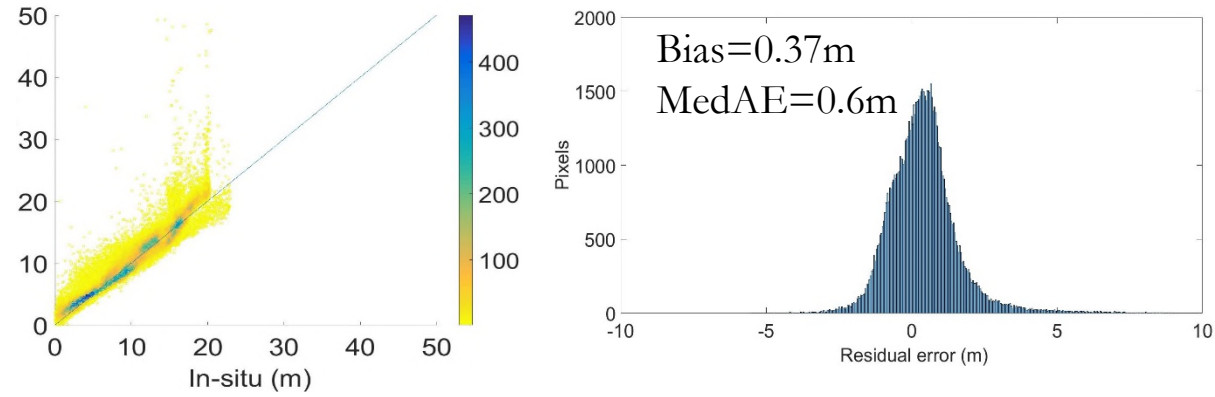
S-44 Specification Matrix IHO Standards

	Criteria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
B	BATHYMETRY														
a	Depth THU [m]	500	200	100	50	20	15	10	5	2	1	0.5	0.35	0.1	0.05
b	Depth THU [% of depth]	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1						
c	Depth TVU "a" [m]	100	50	25	10	5	2	1	0.5	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05
d	Depth TVU "b" Note 1	0.20	0.10	0.05	0.023	0.02	0.013	0.01	0.0075	0.004	0.002				
e	Feature Detection [m]	50	20	10	5	2	1	0.75	0.7	0.5	0.3	0.25	0.2	0.1	0.05
f	Feature Detection [% of Depth]	25	20	10	5	3	2	1	0.5	0.25					
g	Feature Search [%]	1	3	5	10	20	30	50	75	100	120	150	200	300	
h	Bathymetric Coverage [%]	1	3	5	10	20	30	50	75	100	120	150	200	300	

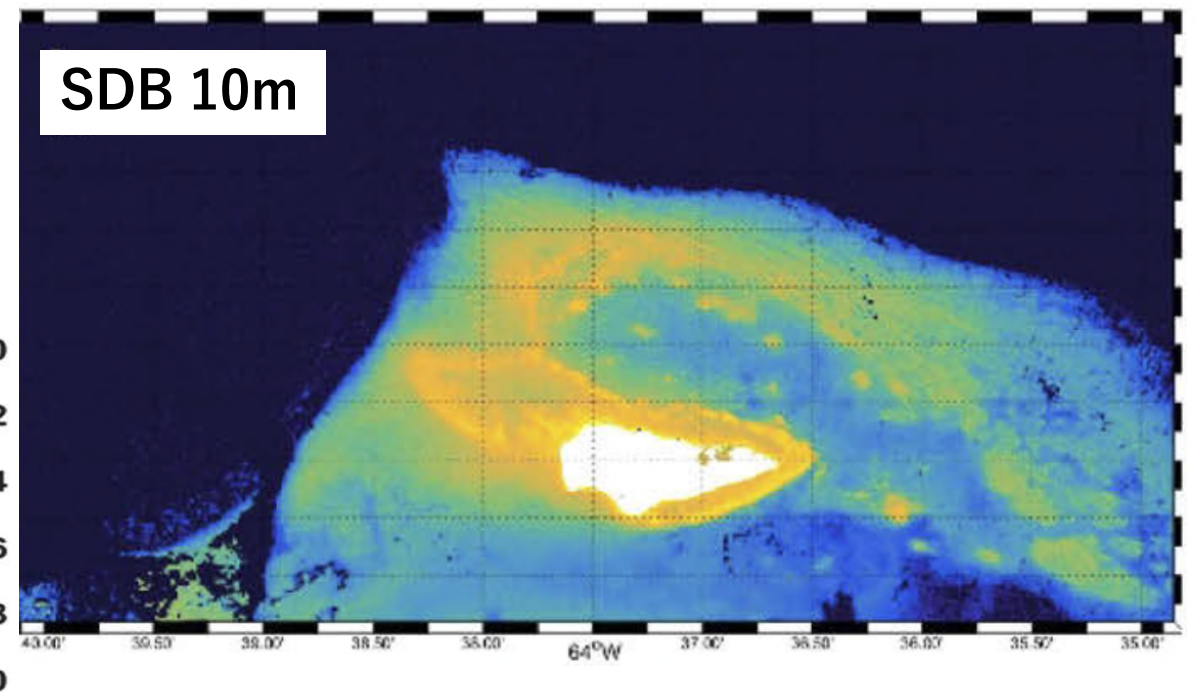
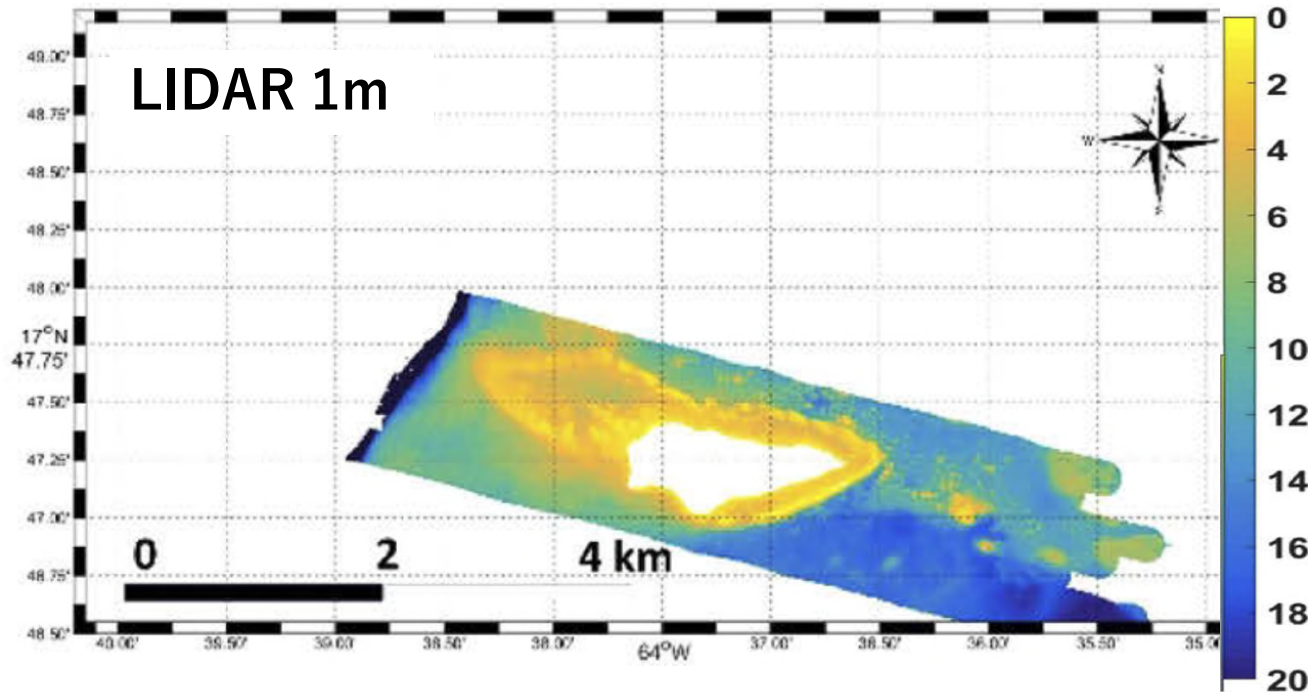
TVU: Total Vertical Uncertainty

Área piloto	Año	Bias (m)	MedAE (m)	N (píxeles)	Profundidades (m)	Artículo científico publicado
Buck	2018	0.19	0.60	93210	0-22	Caballero y Stumpf, 2020a
Culebra	2018	0.41	0.98	79225	0-20	Caballero y Stumpf, 2020a
Puerto Rico	2018	0.25	1.34	2023845	0-30	No publicado
Dry Tortugas	2017	-0.15	0.22	419306	0-6	Caballero y Stumpf, 2019
Cayo Hueso	2016	0.05	0.22	1203174	0-6	Caballero y Stumpf, 2019; Caballero et al., 2019
Miami	2019	-0.16	0.62	7365611	0-25	No publicado
West Palm Beach	2016	0.04	0.45	78741	0-18	Caballero y Stumpf, 2019
Joseph Bay	2017	0.10	0.30	636807	0-12	Caballero y Stumpf, 2020b
Cape Lookout	2017	-0.20	0.40	271635	0-13	Caballero y Stumpf, 2020b
Hatteras	2019	0.27	0.41	107044	0-7	No publicado

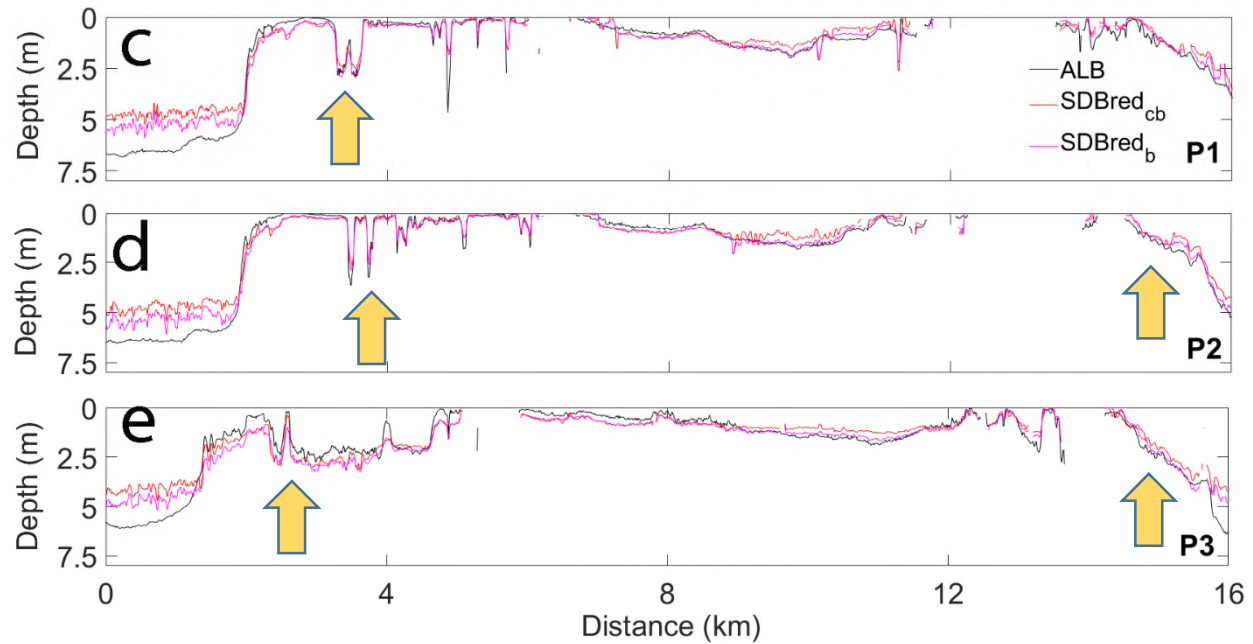
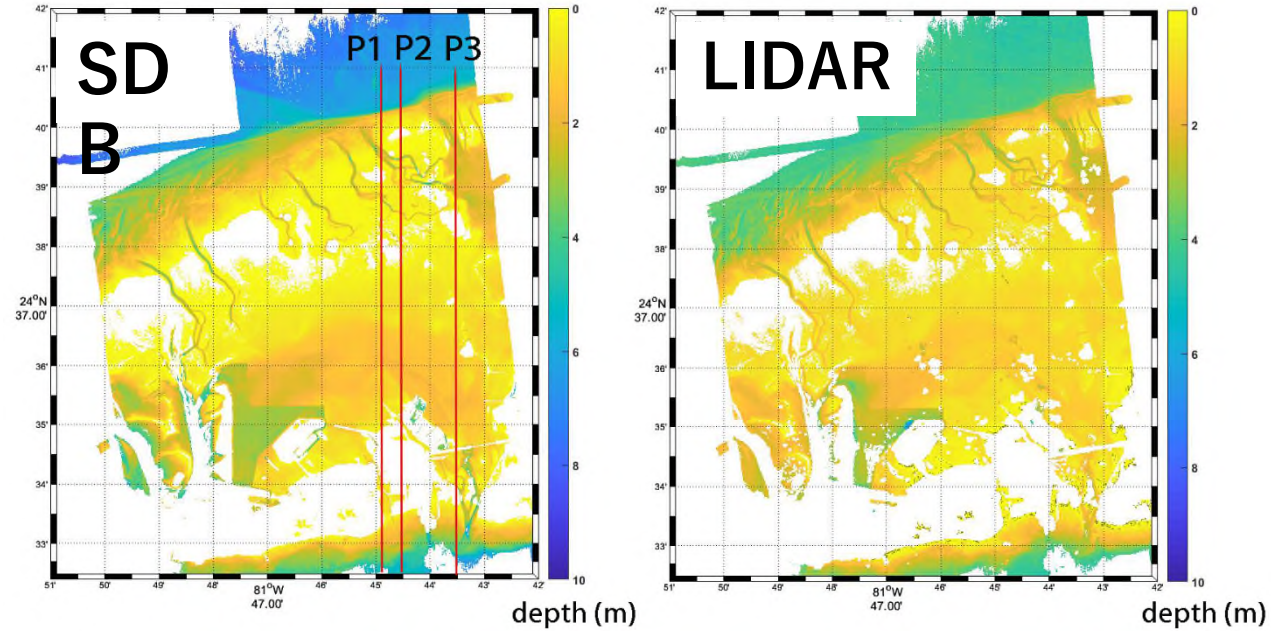
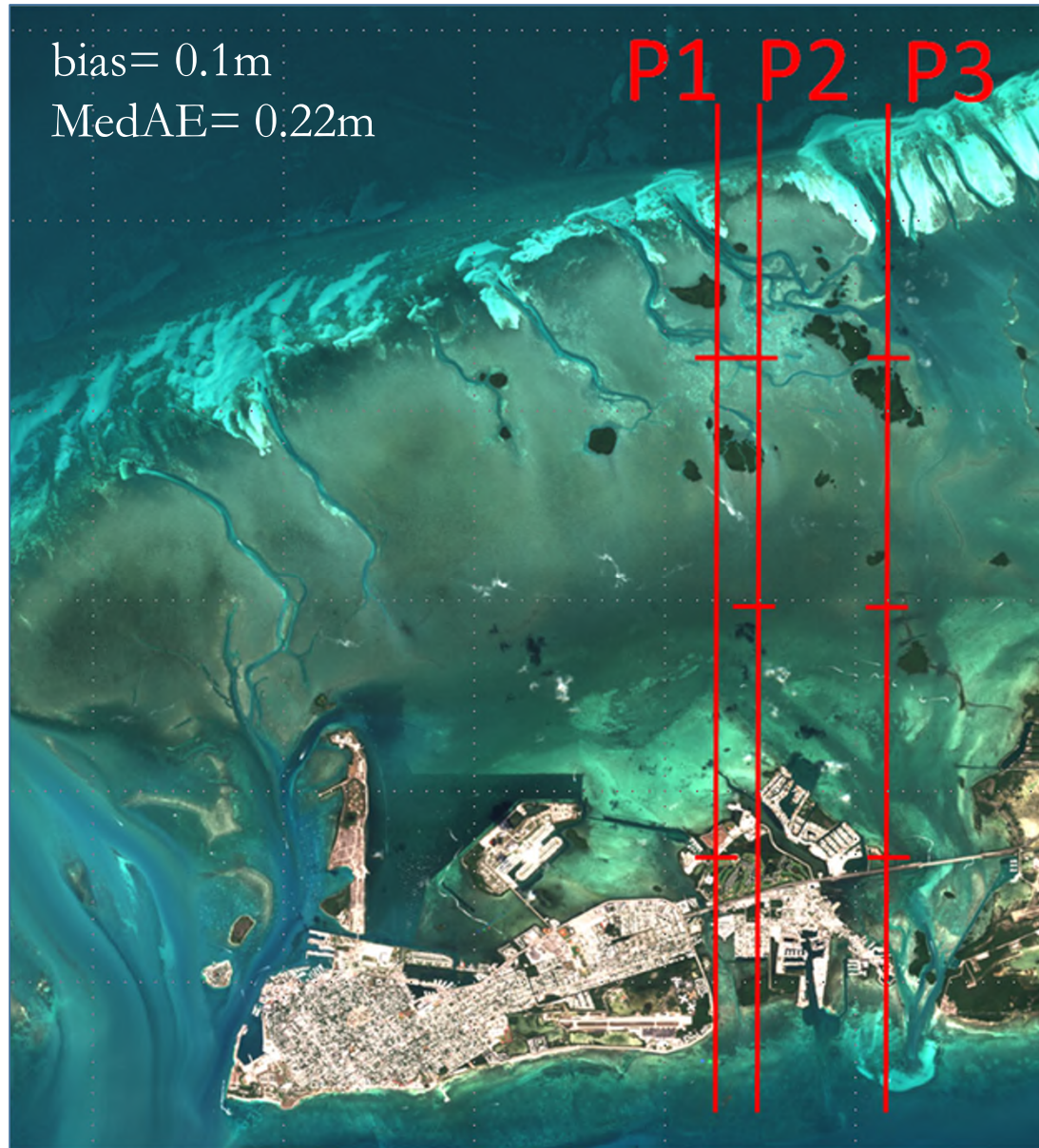
Caribe: aguas transparentes



Cobertura espacial más amplia y completa que lidar

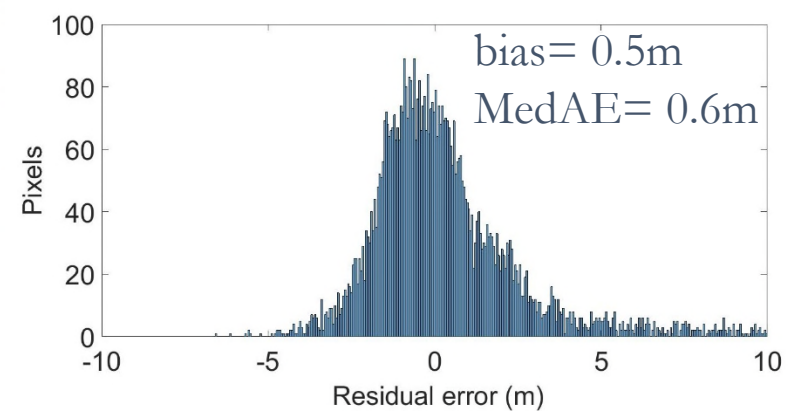
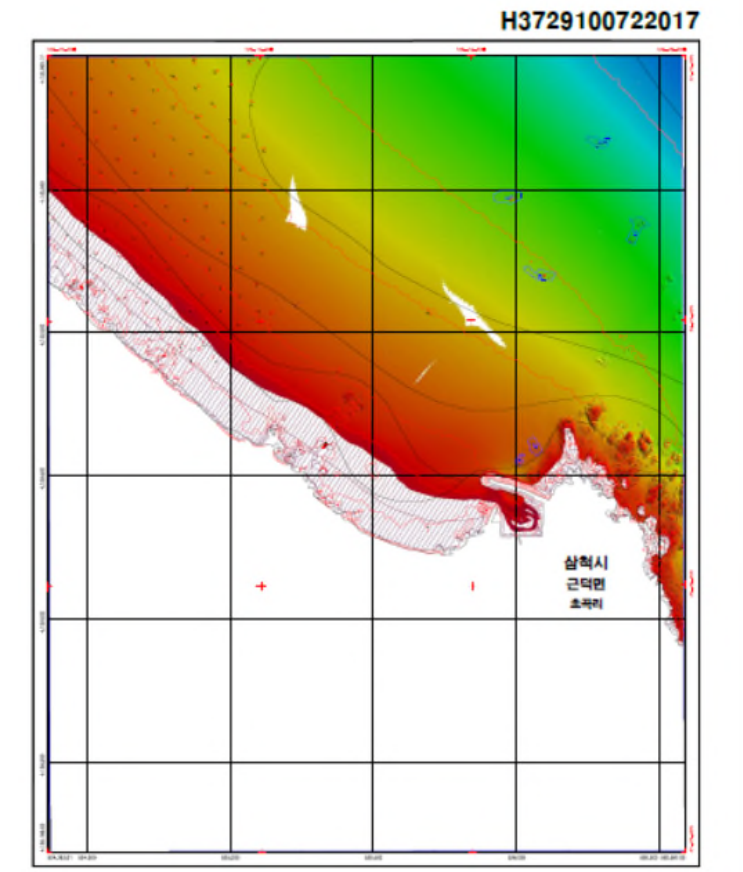
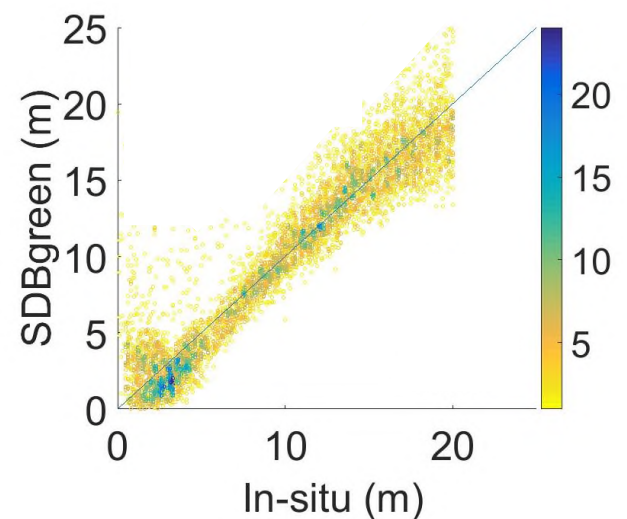
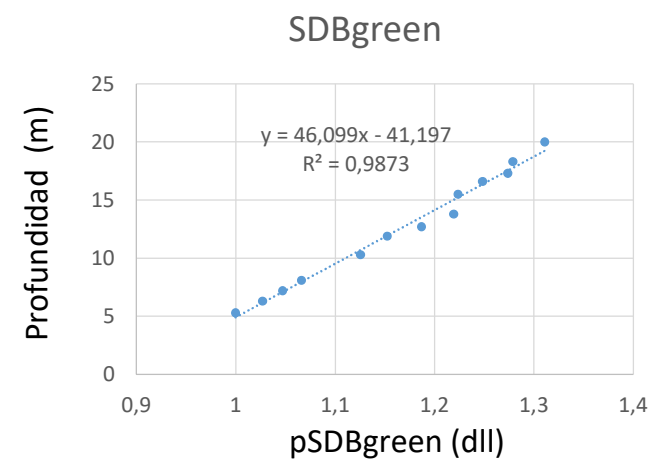


Cayo Hueso (Florida): aguas transparentes a moderadamente turbias

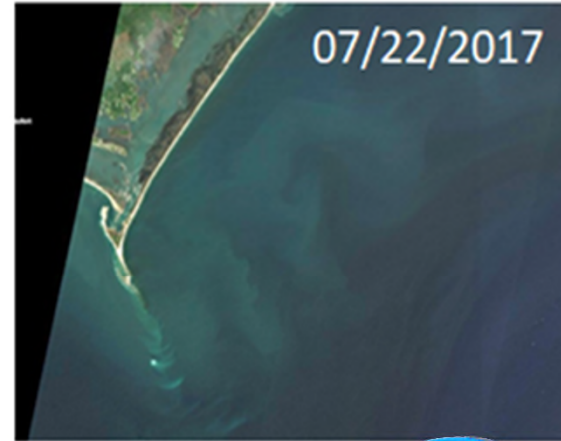
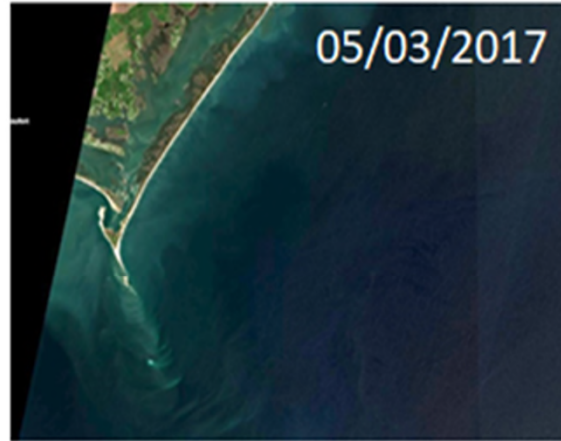


Corea del Sur

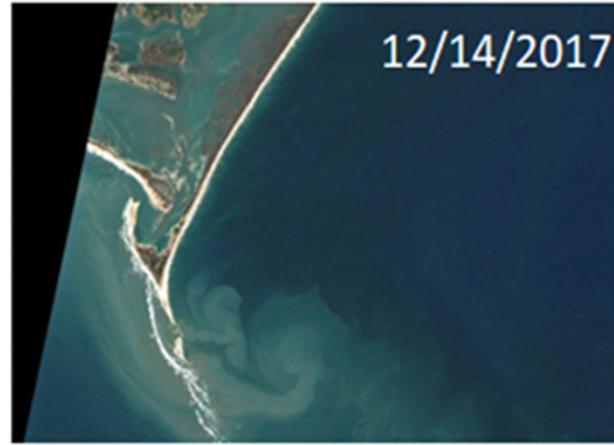
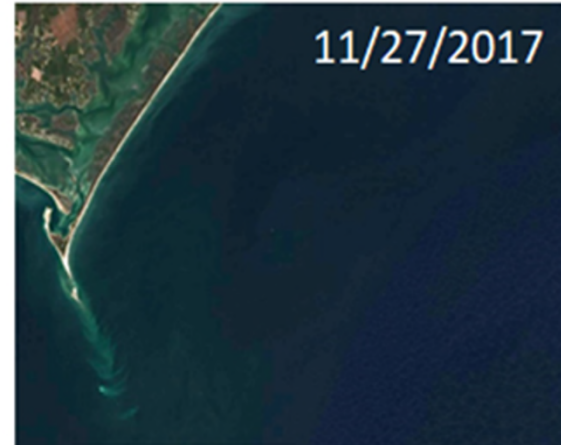
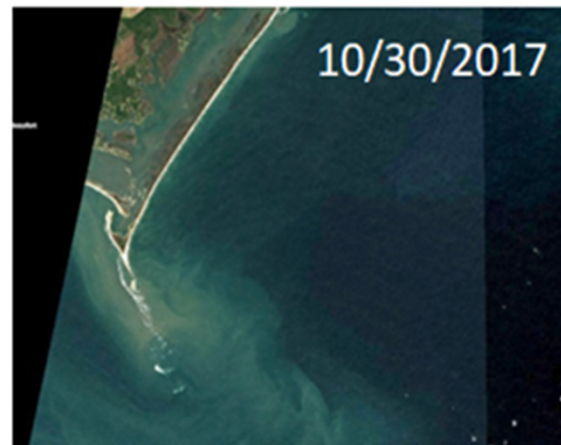
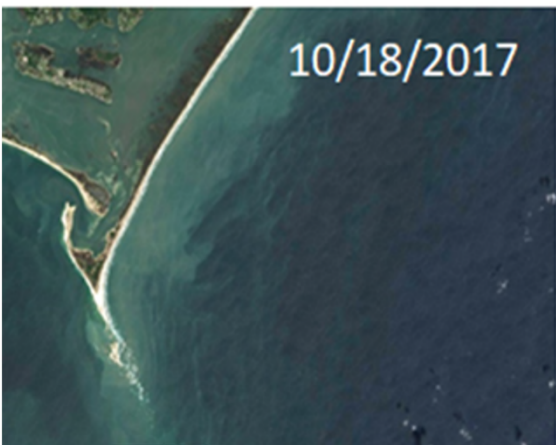
Aplicabilidad inmediata en otras regiones y condiciones atmosféricas y de calidad del agua



Cape Lookout (Carolina del Norte): aguas ópticamente complejas

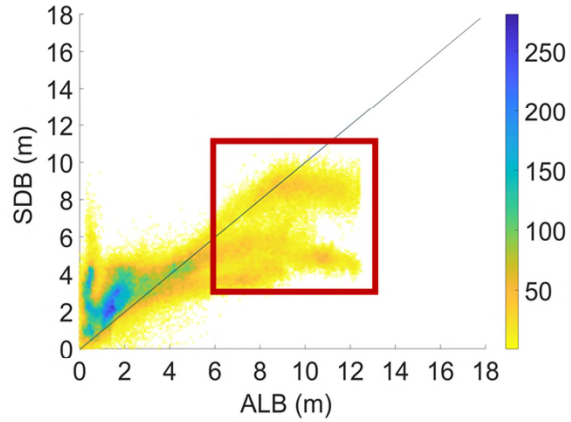


Selecciona la mejor escena

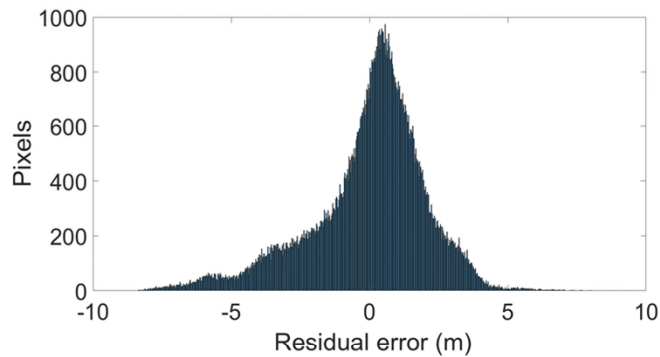


Cape Lookout (Carolina del Norte): aguas ópticamente complejas

12 febrero

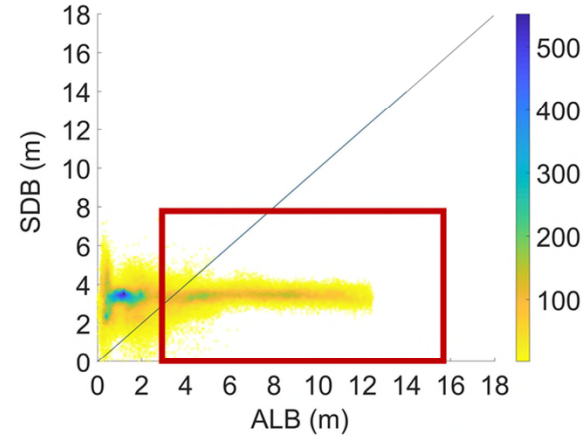


¡Falso asomeramiento!

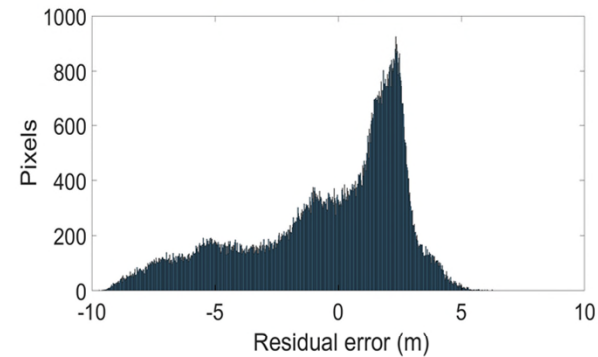


MedAE=1.6 m

30 octubre

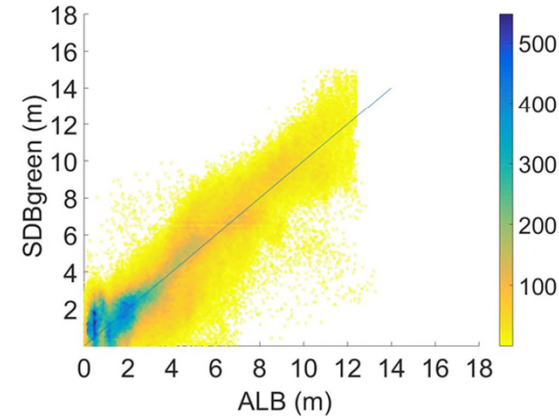


¡Falso asomeramiento!

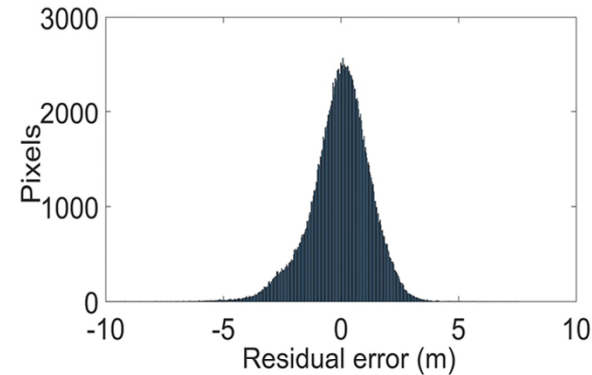


MedAE= 3.1 m

27 noviembre

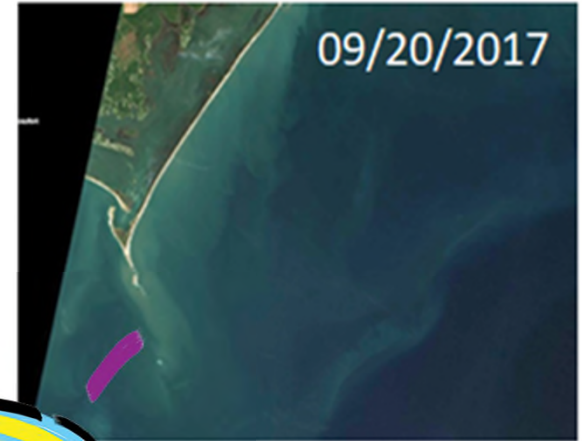
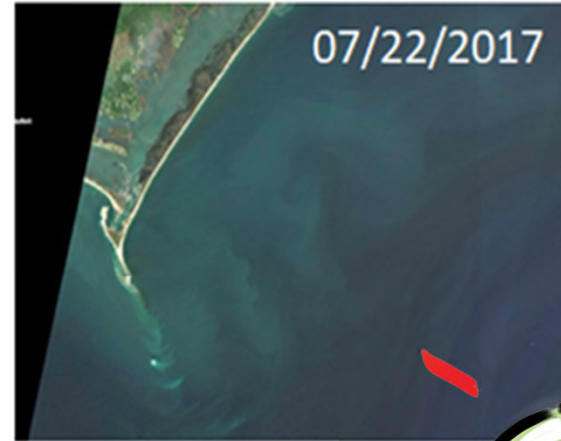
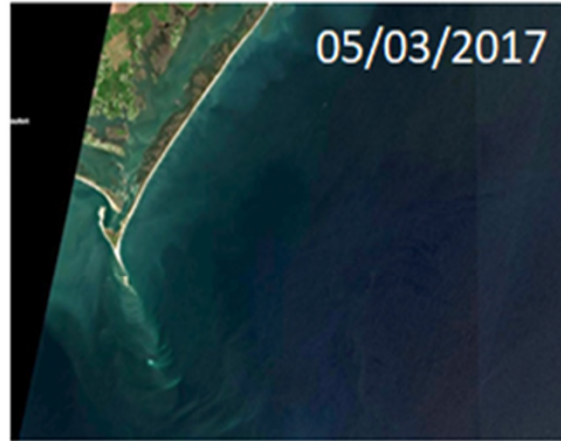


Escena óptima

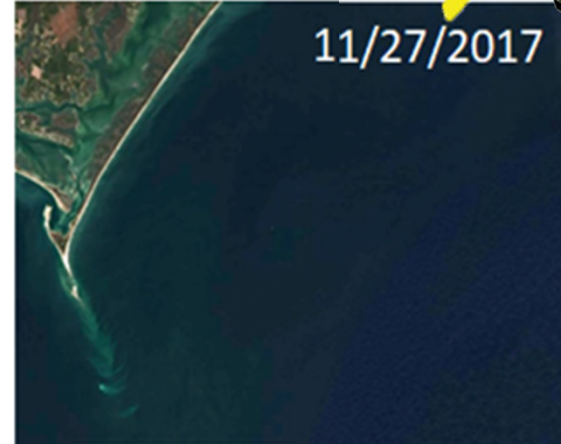
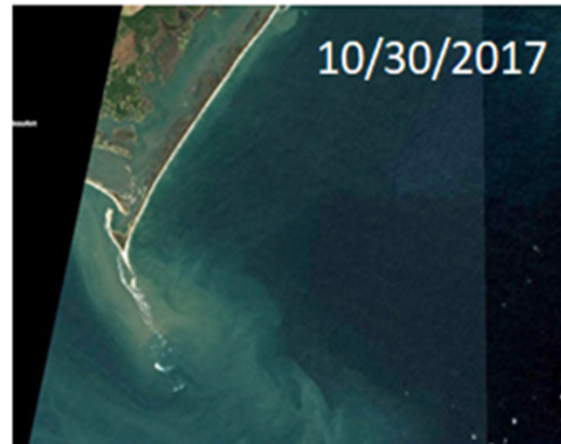
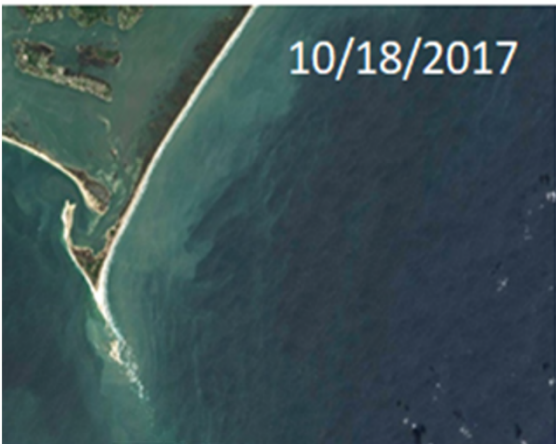


MedAE=0.8m

Cape Lookout (Carolina del Norte): aguas ópticamente complejas

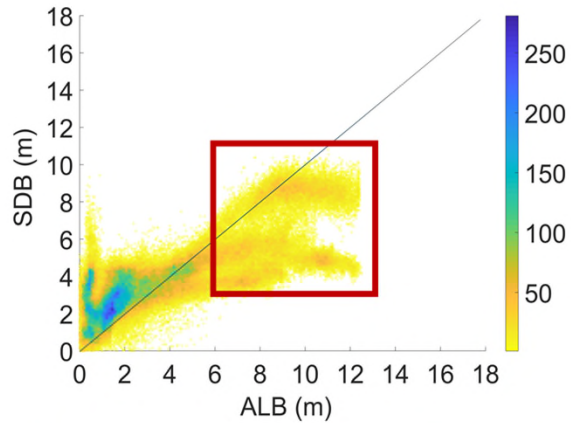


Usa todas las escenas
Modelo automático

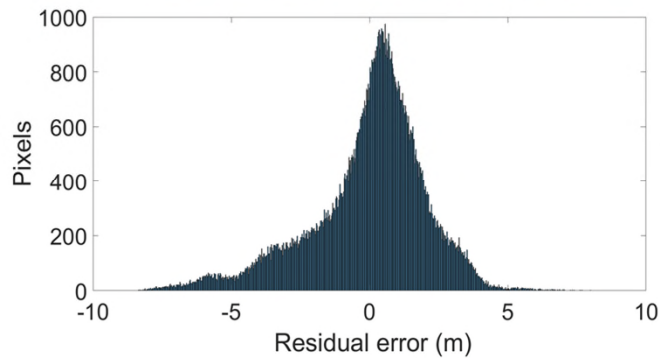


Cape Lookout (Carolina del Norte): aguas ópticamente complejas

12 febrero

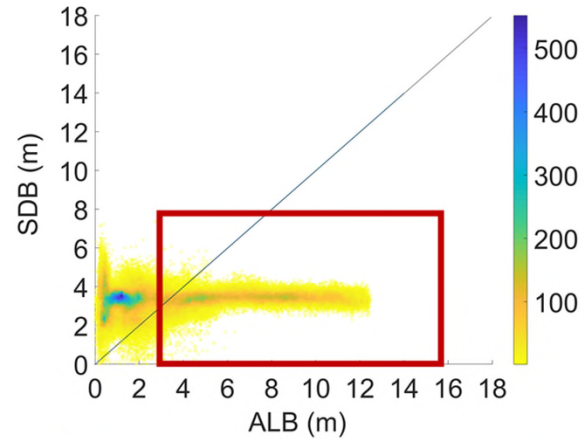


¡Falso asomeramiento!

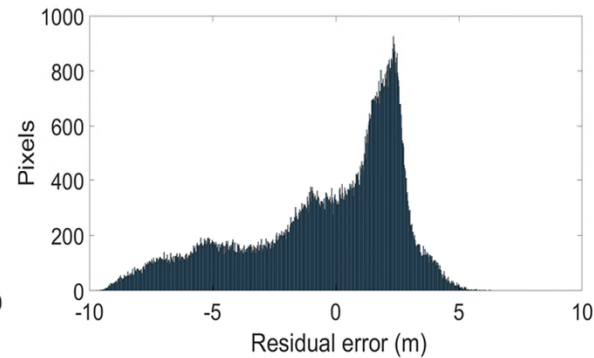


MedAE=1.6 m

30 octubre

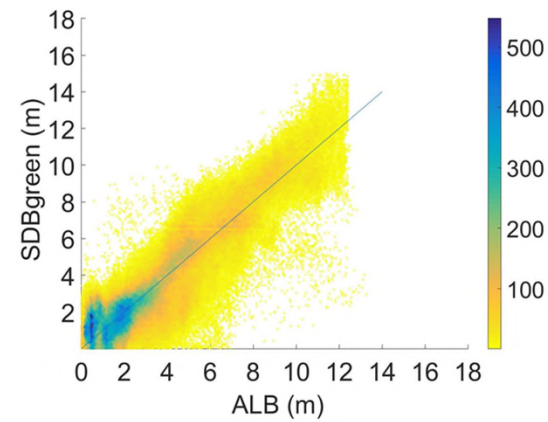


¡Falso asomeramiento!

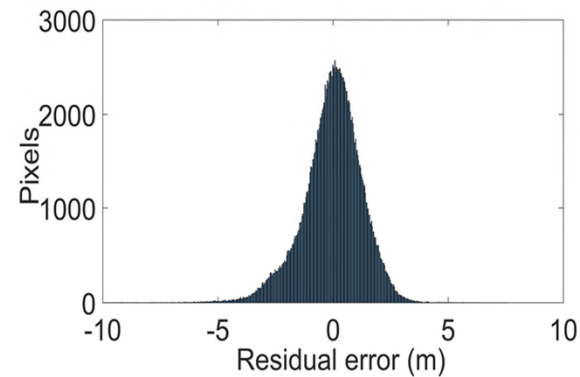


MedAE= 3.1 m

27 noviembre

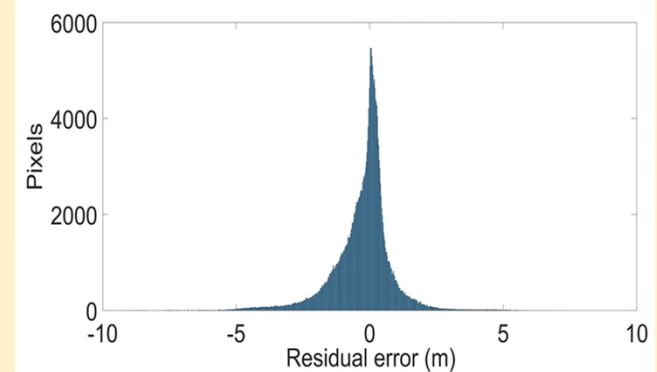
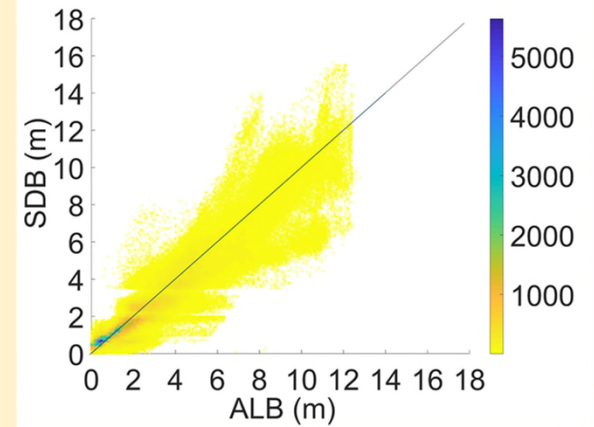


Escena óptima



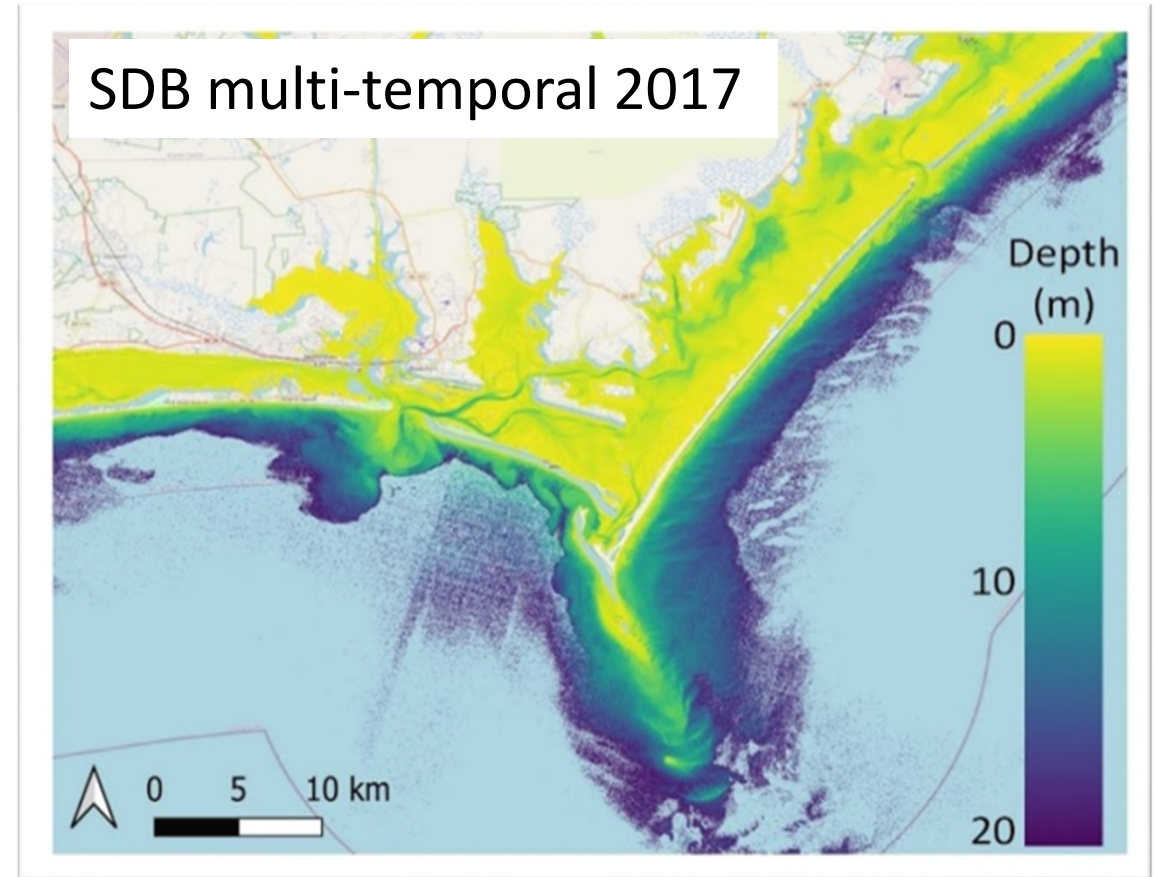
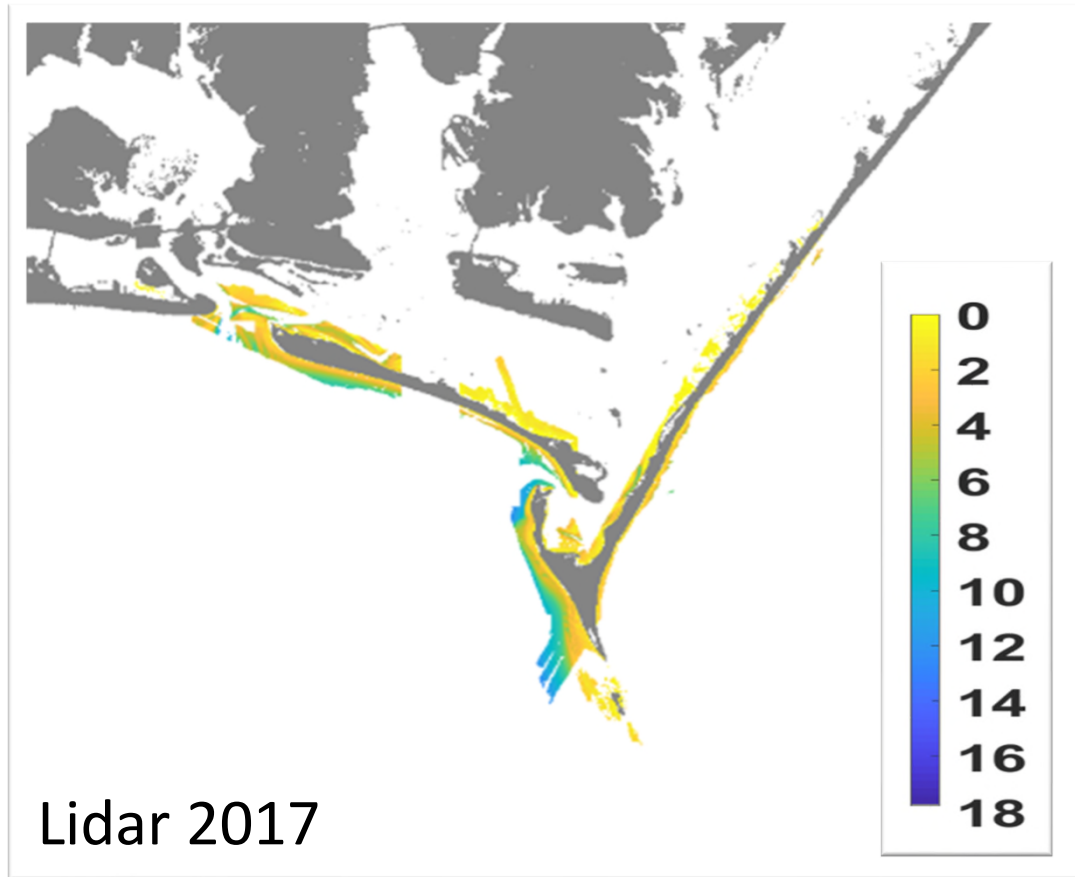
MedAE=0.8m

Multi-temporal



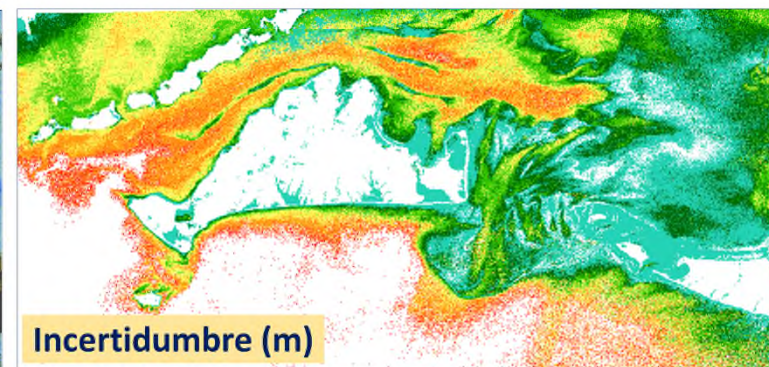
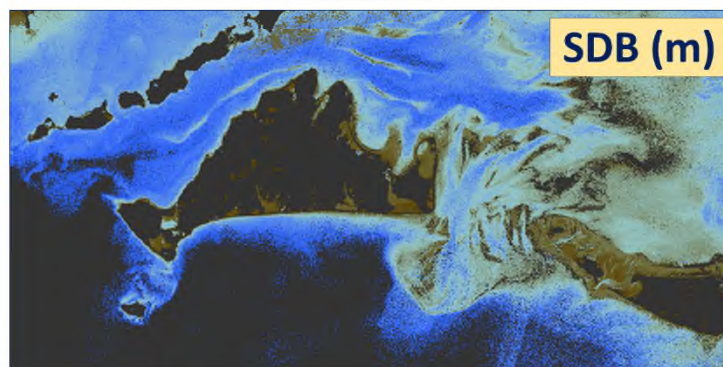
MedAE=0.4m

Cape Lookout (Carolina del Norte): aguas ópticamente complejas

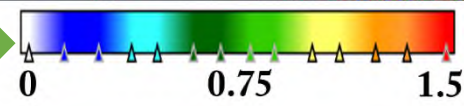


- Corregimos turbidez y rellenamos huecos (nubes, whitecaps, barcos, oleaje, artefactos, etc...): reducción significativa de los errores verticales.
- Generación automatizada de SDB, no es necesario el esfuerzo/tiempo para seleccionar la imagen óptima (subjetivo de la destreza del observador/usuario).

MARTHA'S VINEYARD Y NANTUCKET (NUEVA INGLATERRA): AGUAS EXTREMADAMENTE COMPLEJAS

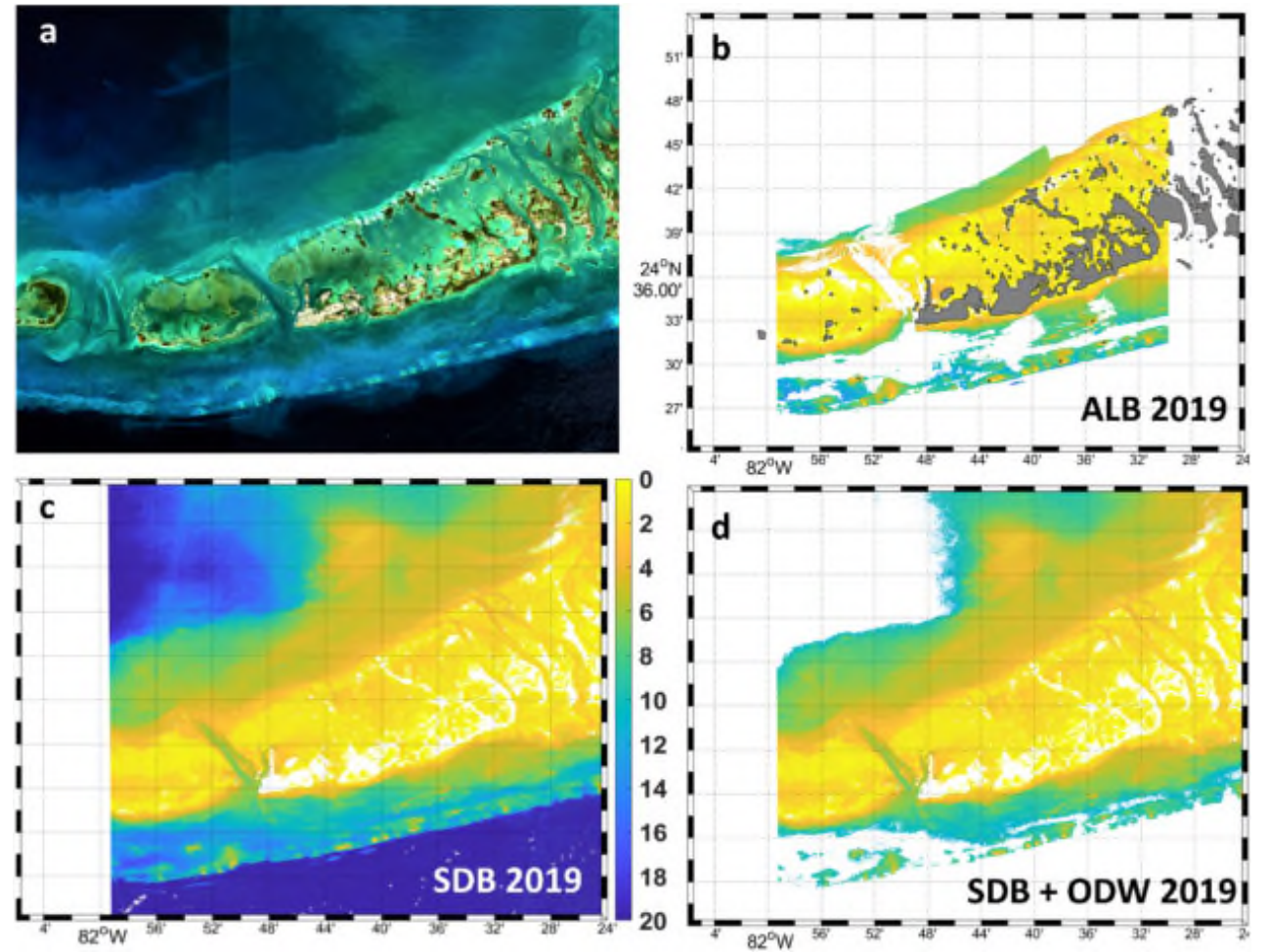
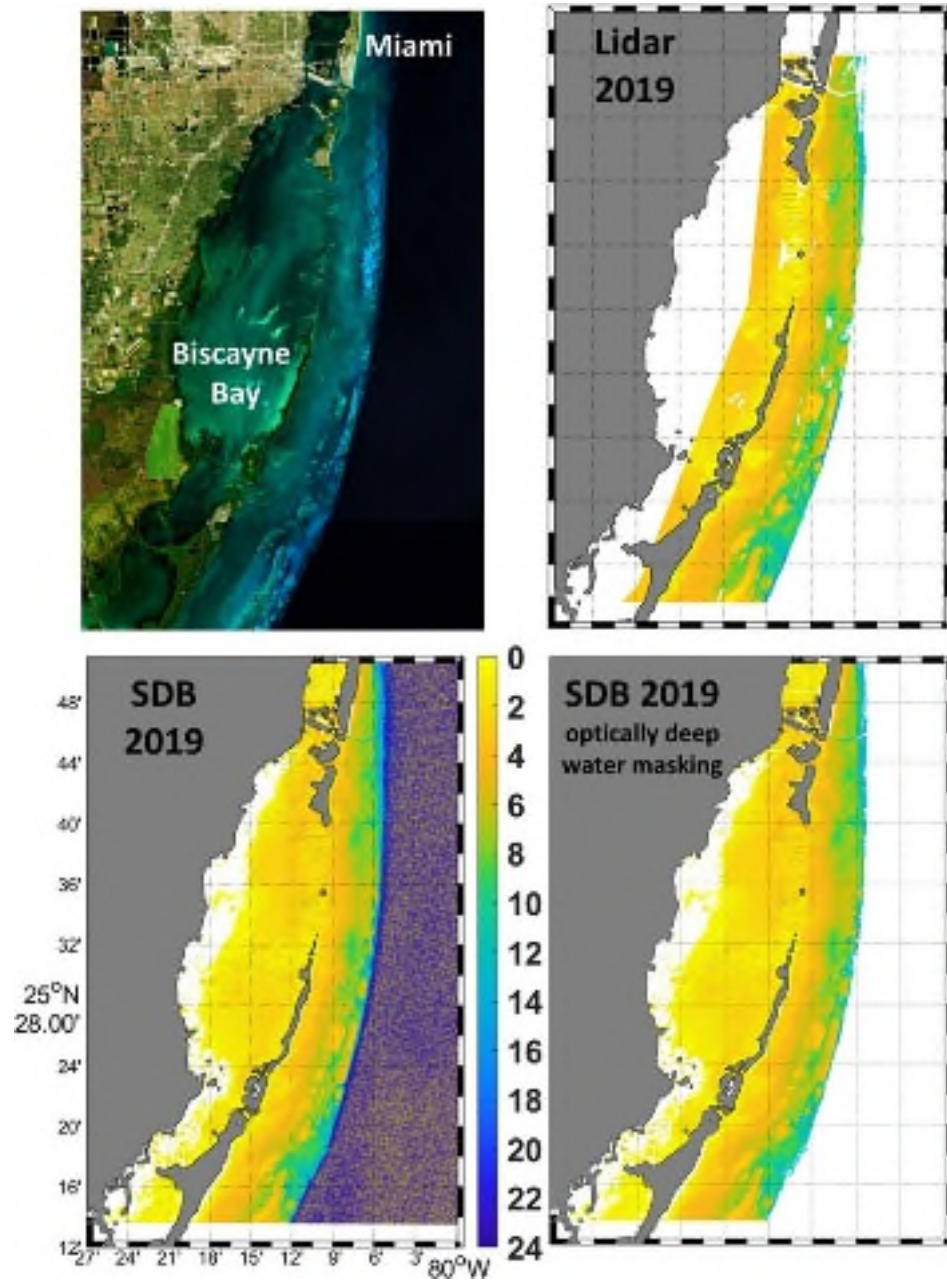


DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD
DE CORTE



CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE
ASOCIADA

Zonas ópticamente profundas

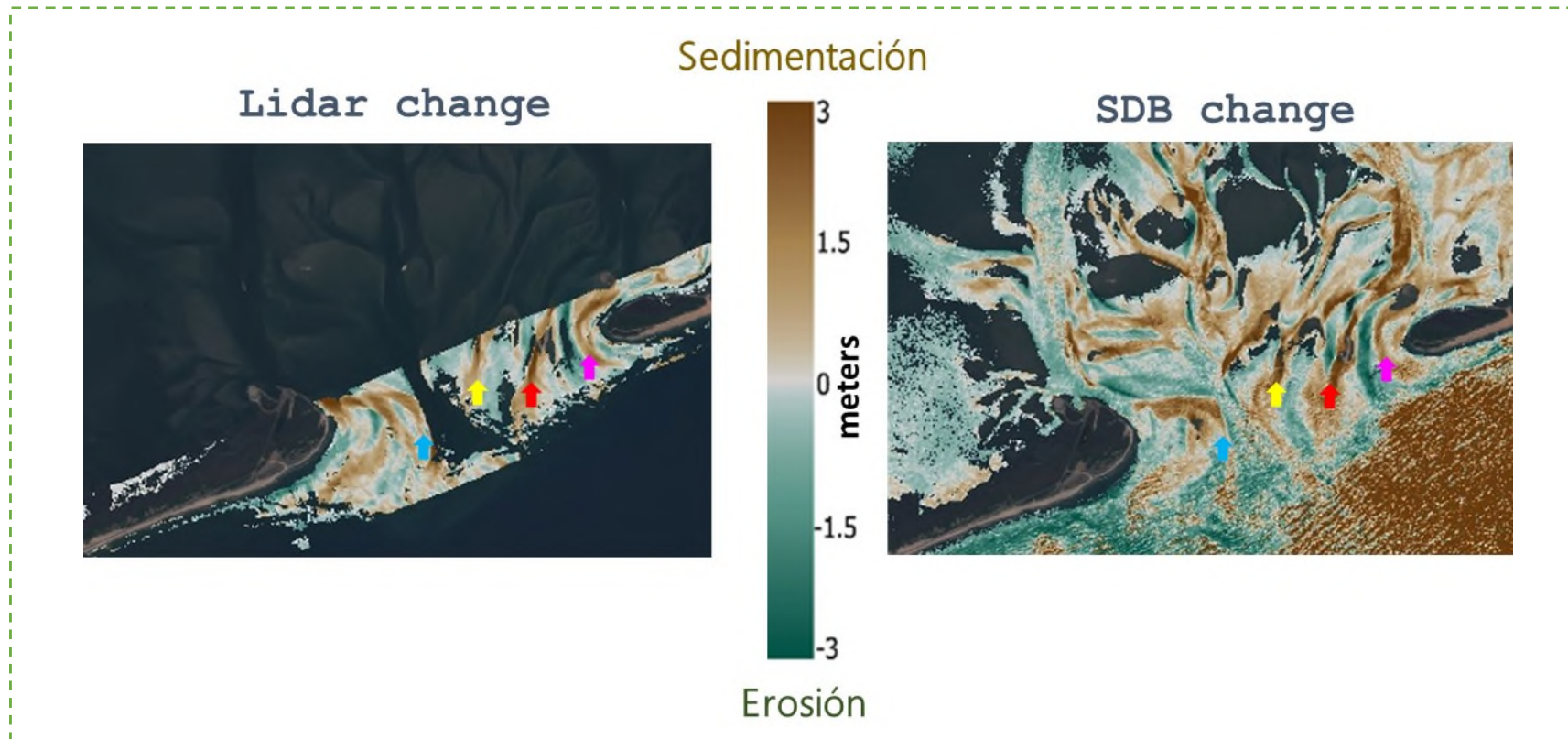




APLICACIONES: BATIMETRÍA RECURSIVA

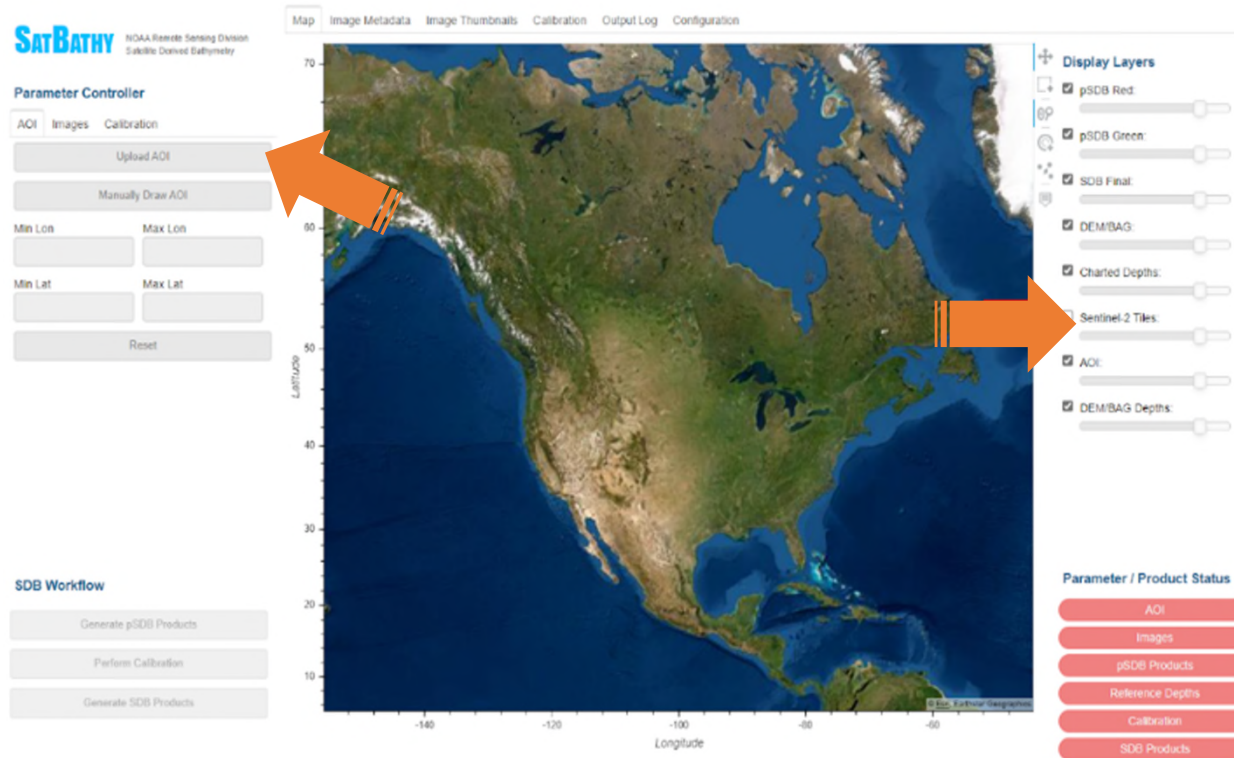
GENERACIÓN, CON GRAN PRECISIÓN, DE MAPAS DE EROSIÓN/ACRECIÓN TRAS EL PASO DEL HURACÁN FLORENCE EN SEPTIEMBRE 2018, QUE BARRIÓ LA COSTA DE NUEVA CAROLINA

ESTA ESTRATEGIA DE OBSERVACIÓN REMOTA SE DEBE CONSIDERAR COMO UNA **TECNOLOGÍA ASEQUIBLE, SEGURA, DE BAJO COSTE Y DE FÁCIL ACCESO EN UBICACIONES REMOTAS** PARA EVALUAR EL IMPACTO DE LOS EVENTOS EXTREMOS



TRANSFERENCIA DE HERRAMIENTAS E INNOVACIÓN

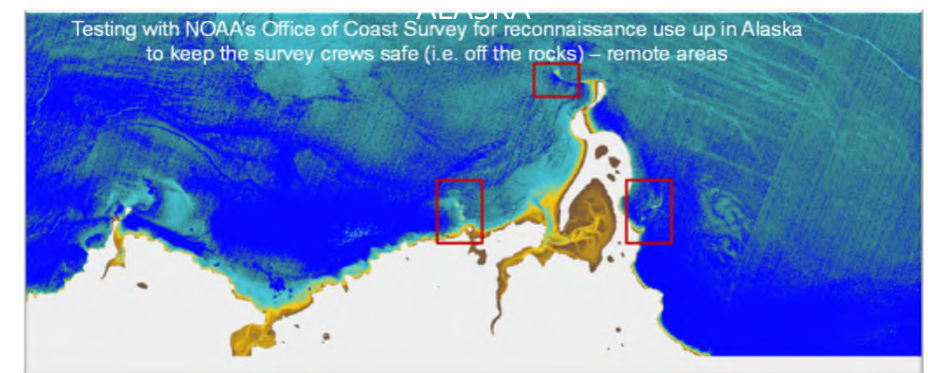
SATBATHY



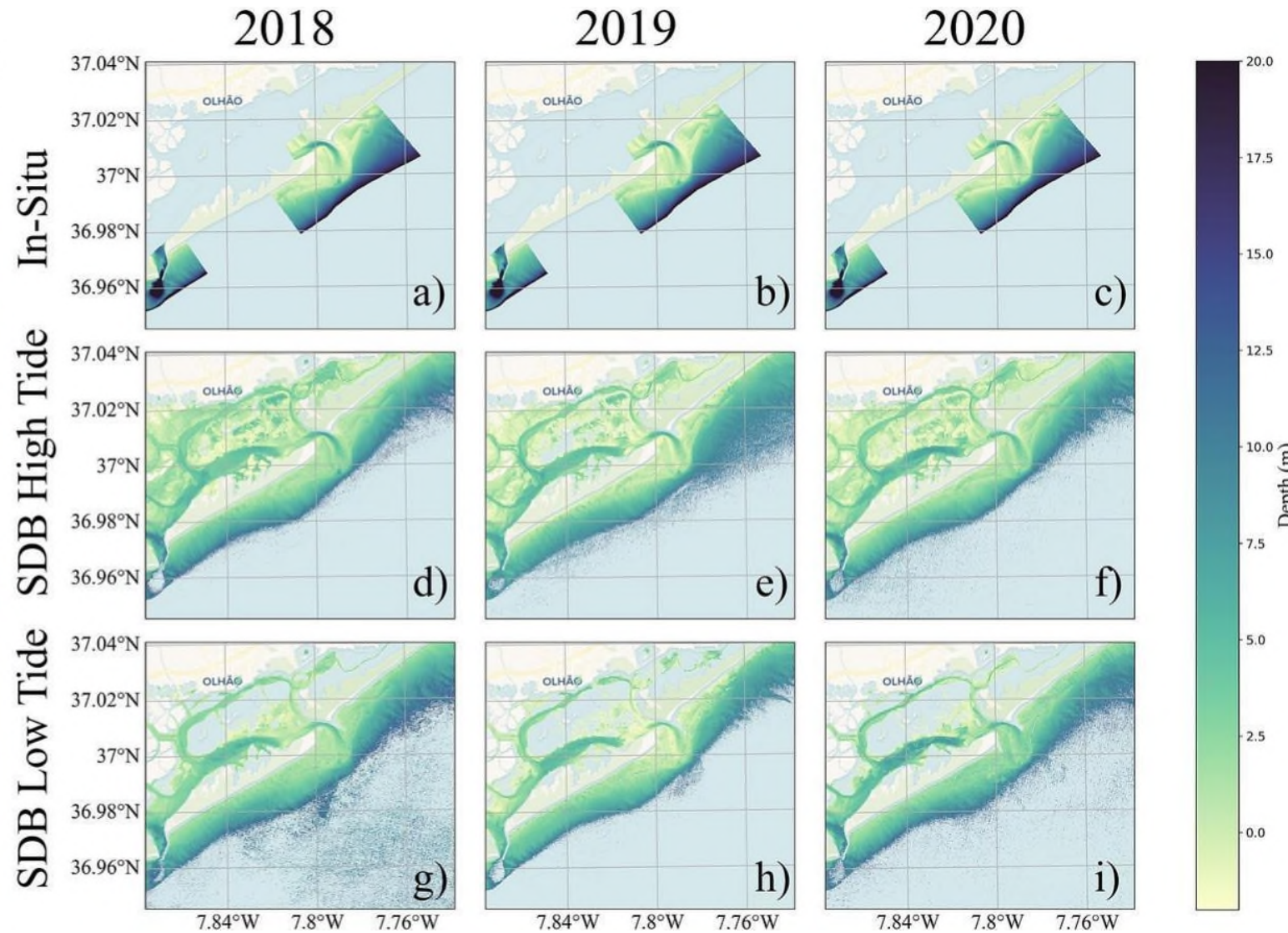
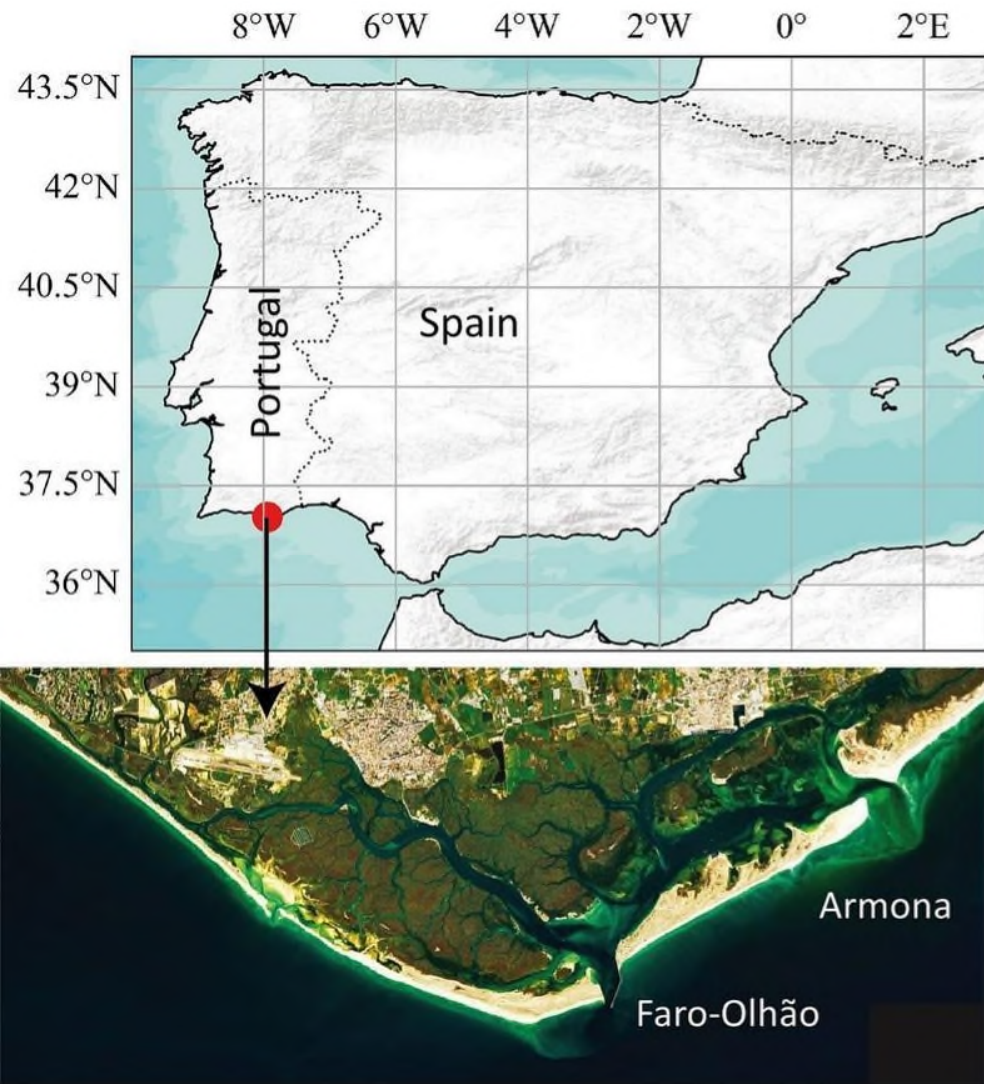
ACTUALIZACIÓN DE CARTAS NÁUTICAS



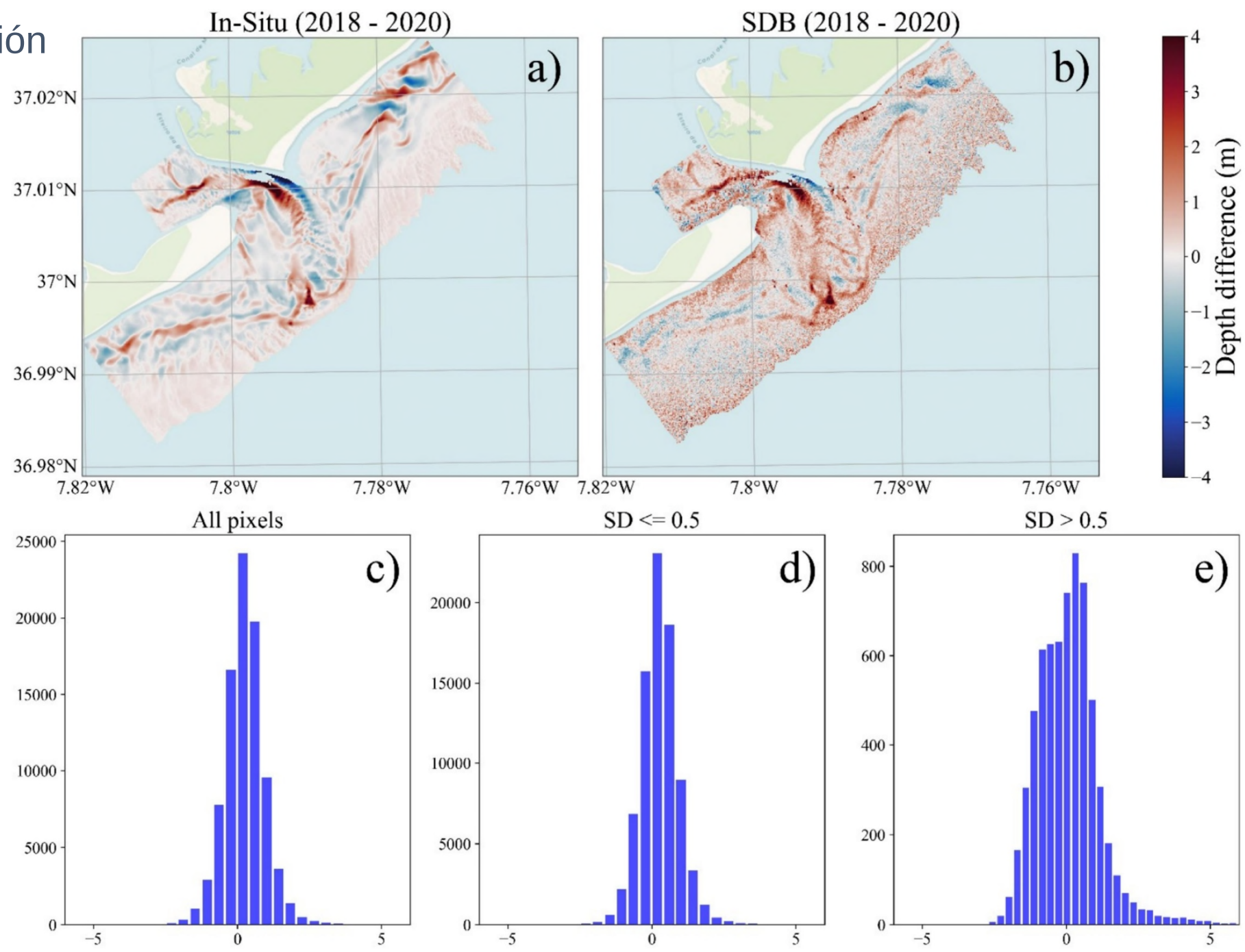
PROYECCIÓN DE LAS NUEVAS RUTAS MARÍTIMAS DURANTE EL DESHIELO EN REGIONES REMOTAS DE ALASKA



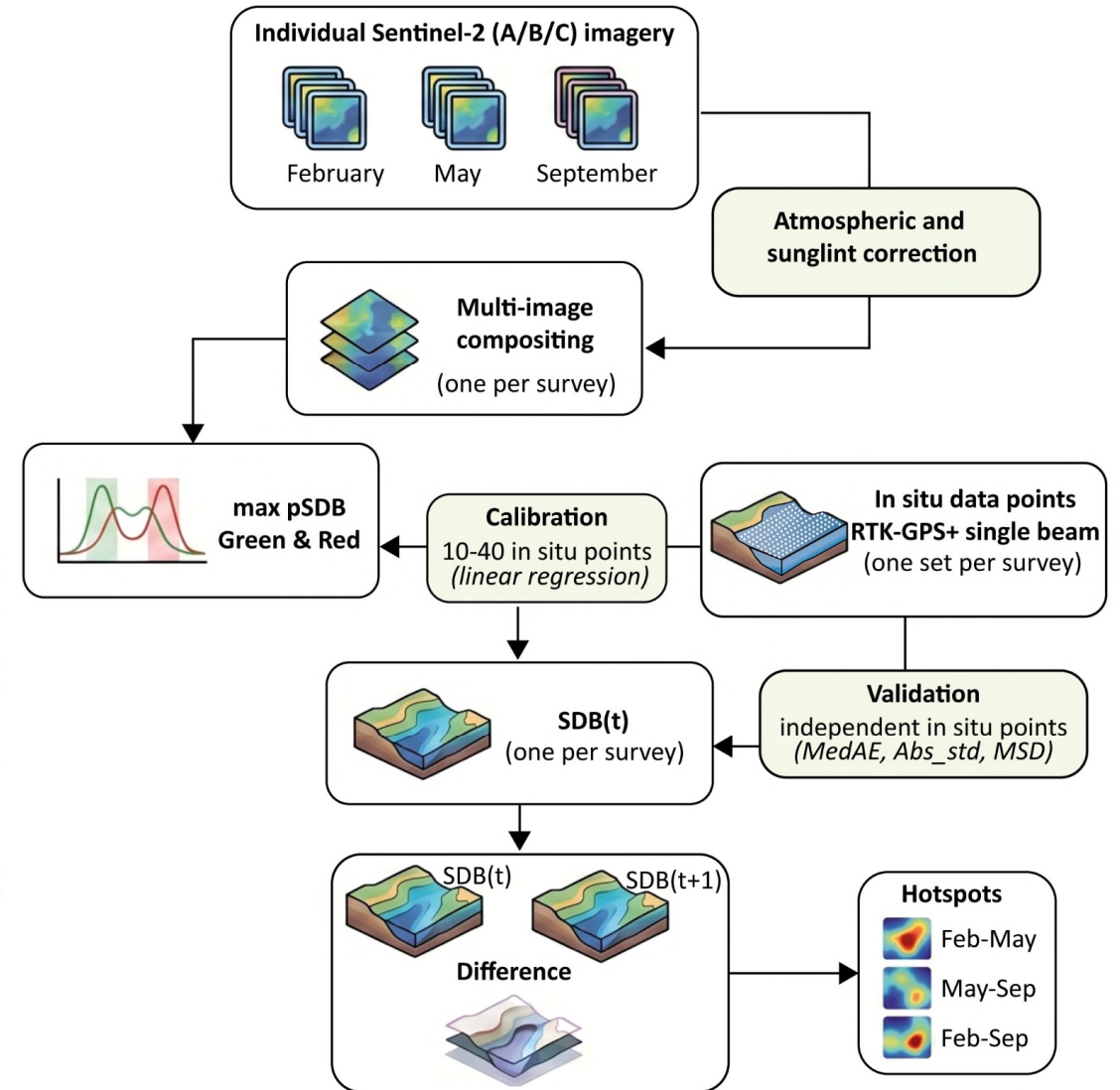
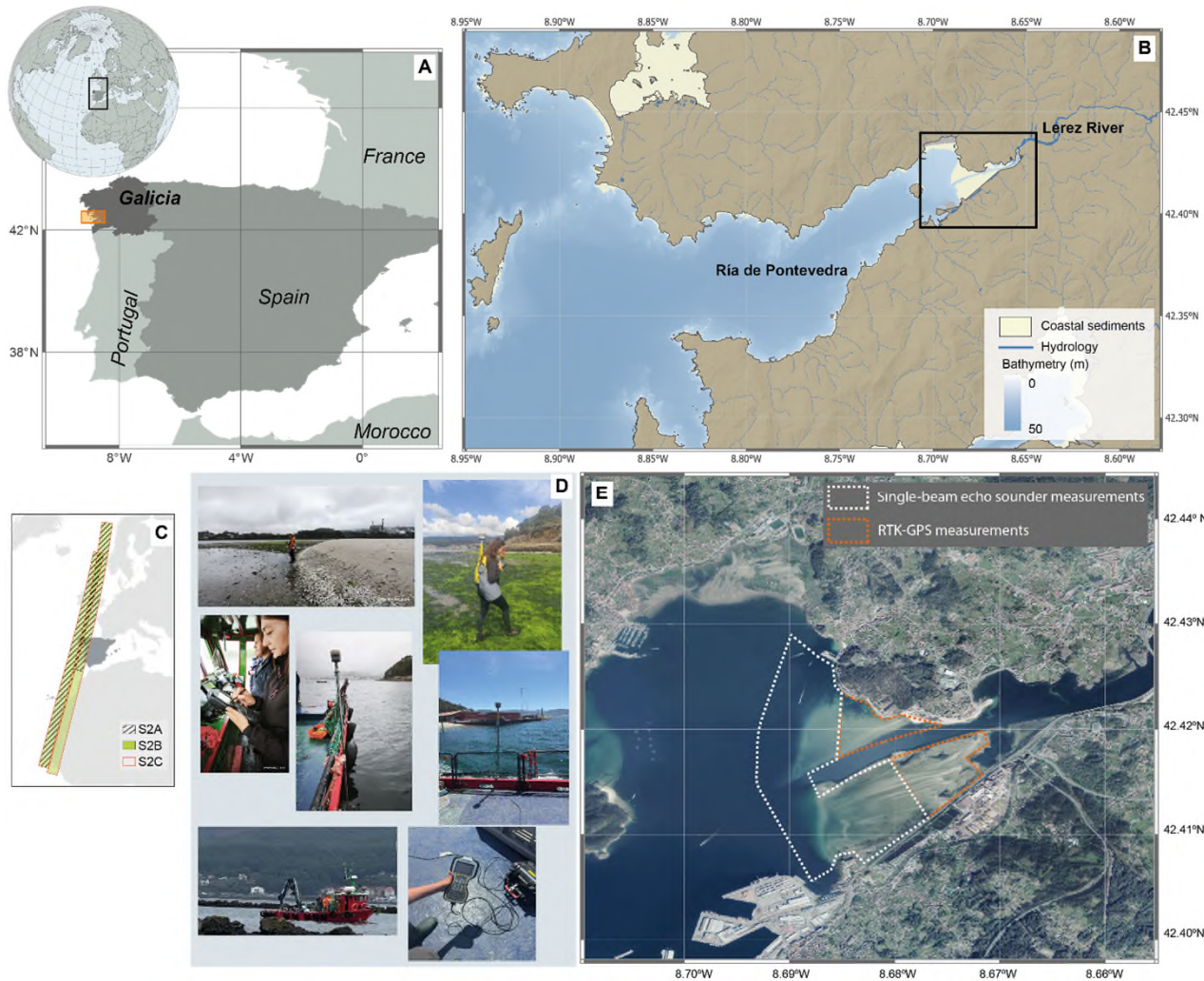
Batrimetría anual: Ría de Formosa



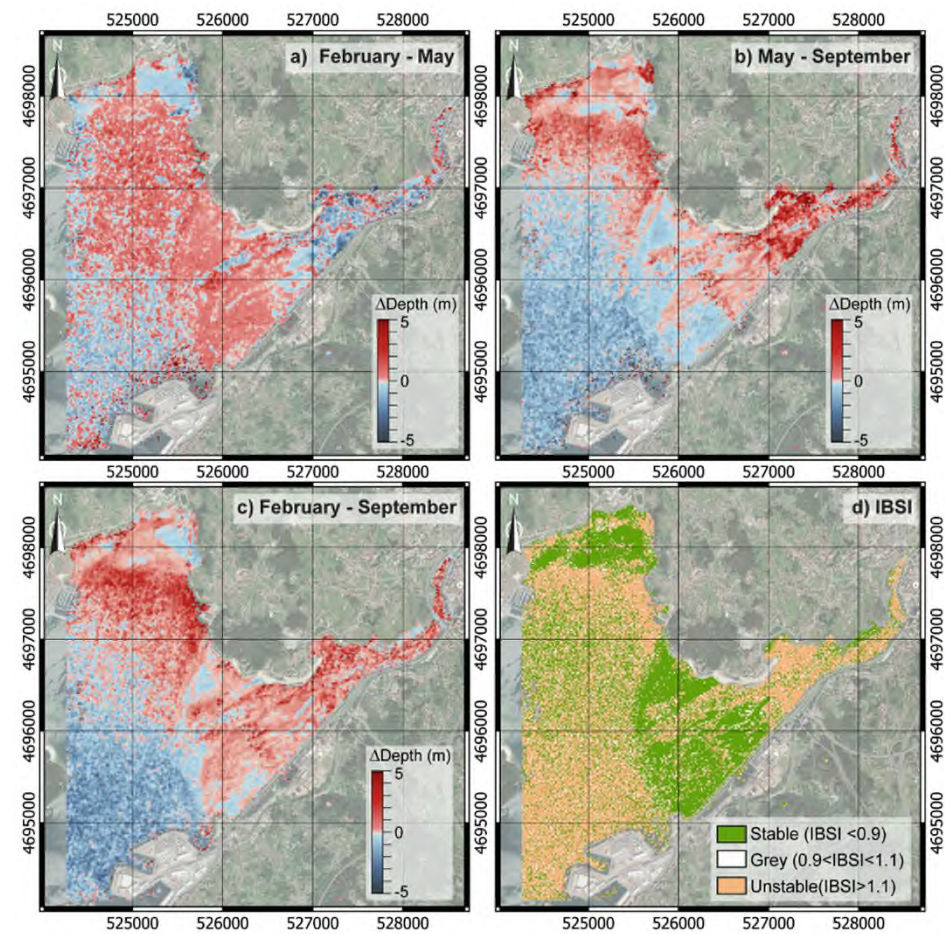
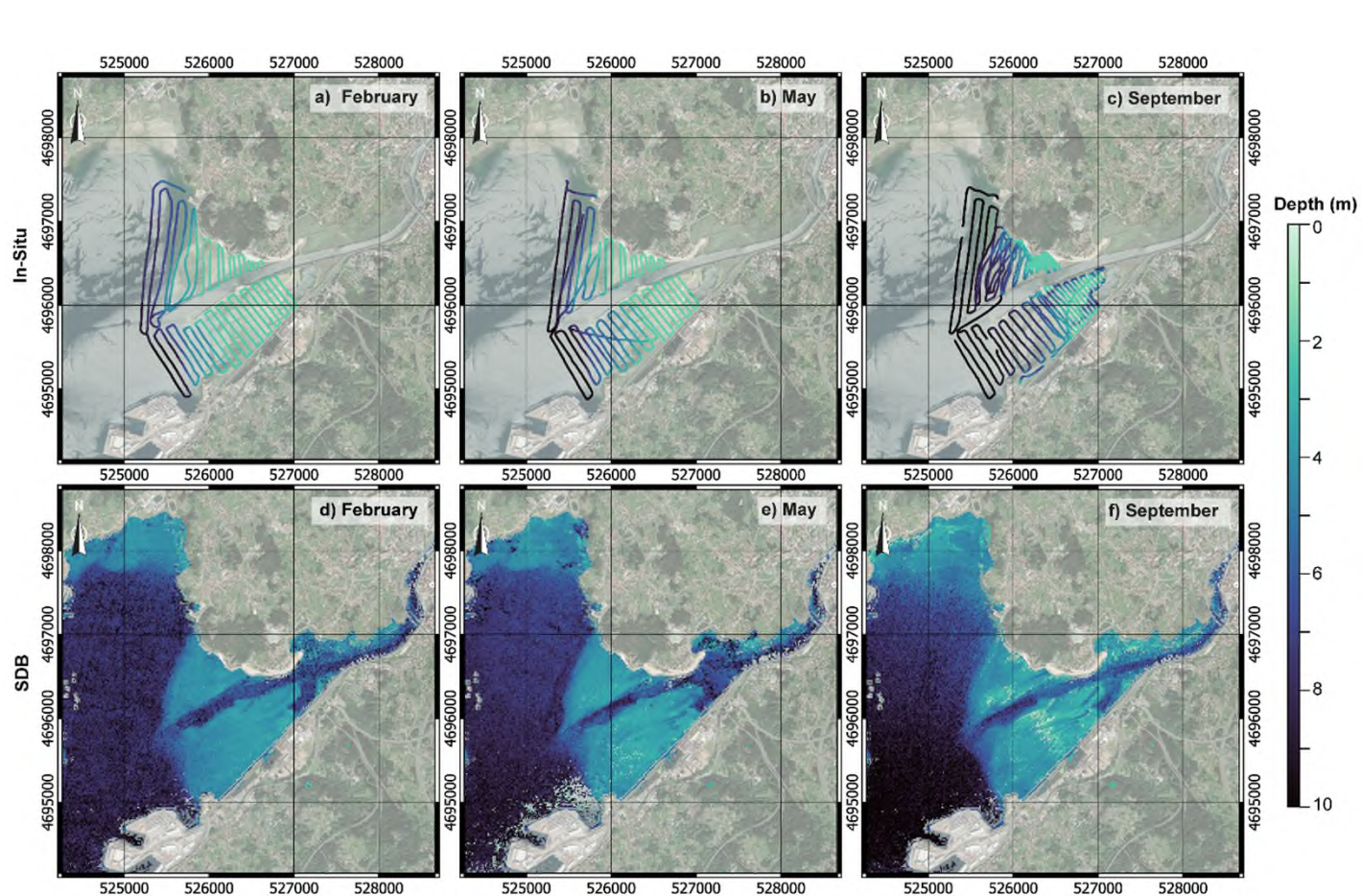
Hotspots de erosión
y sedimentación



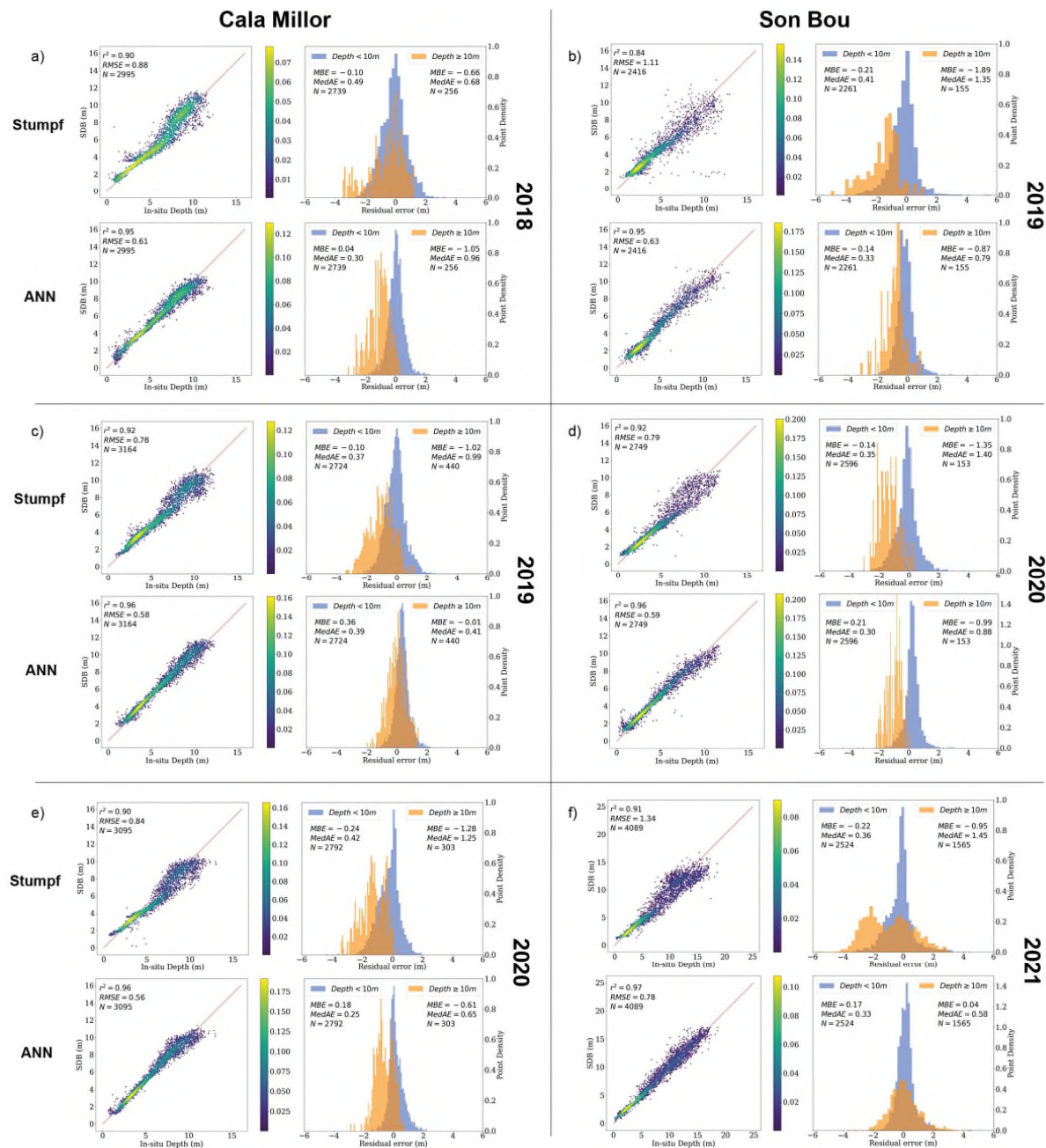
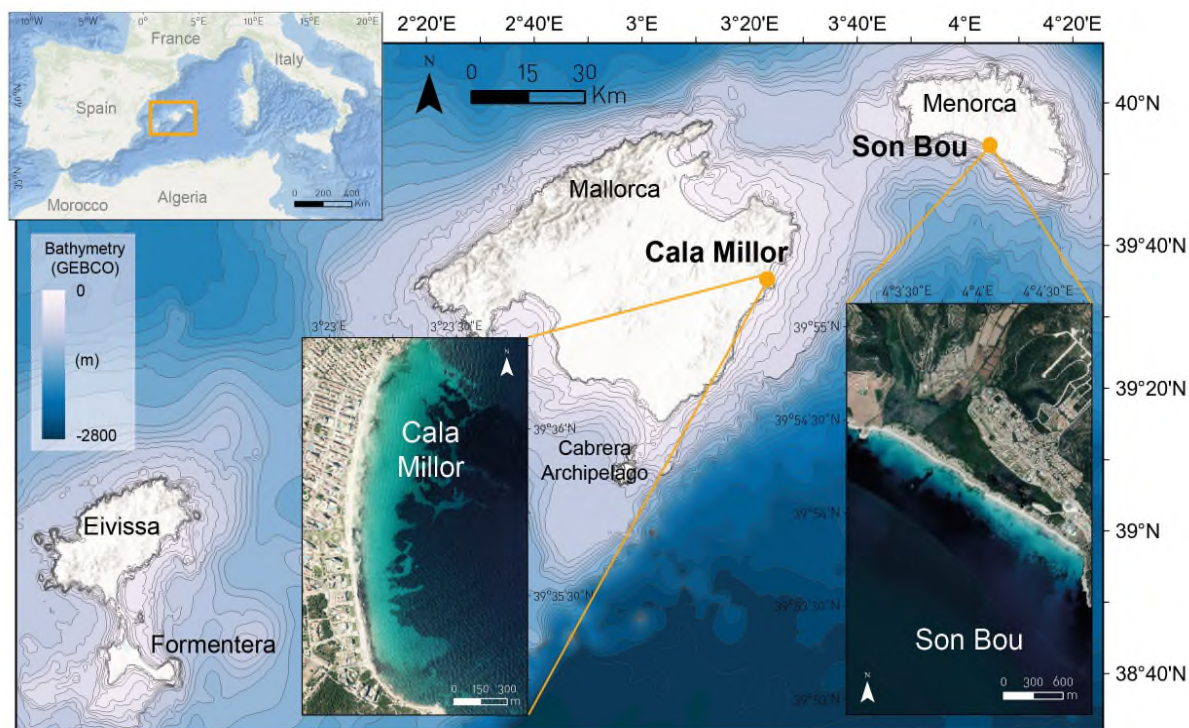
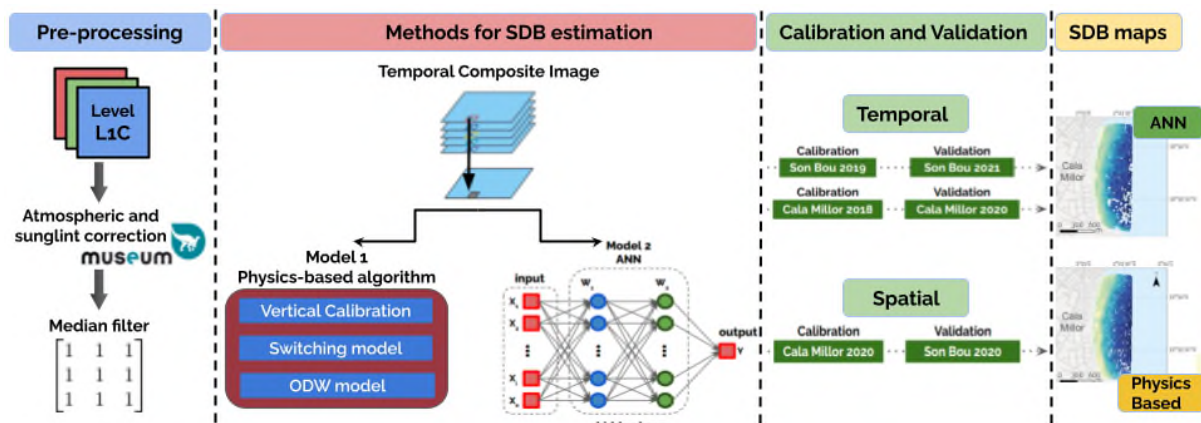
Batrimetría estacional: Ría de Pontevedra



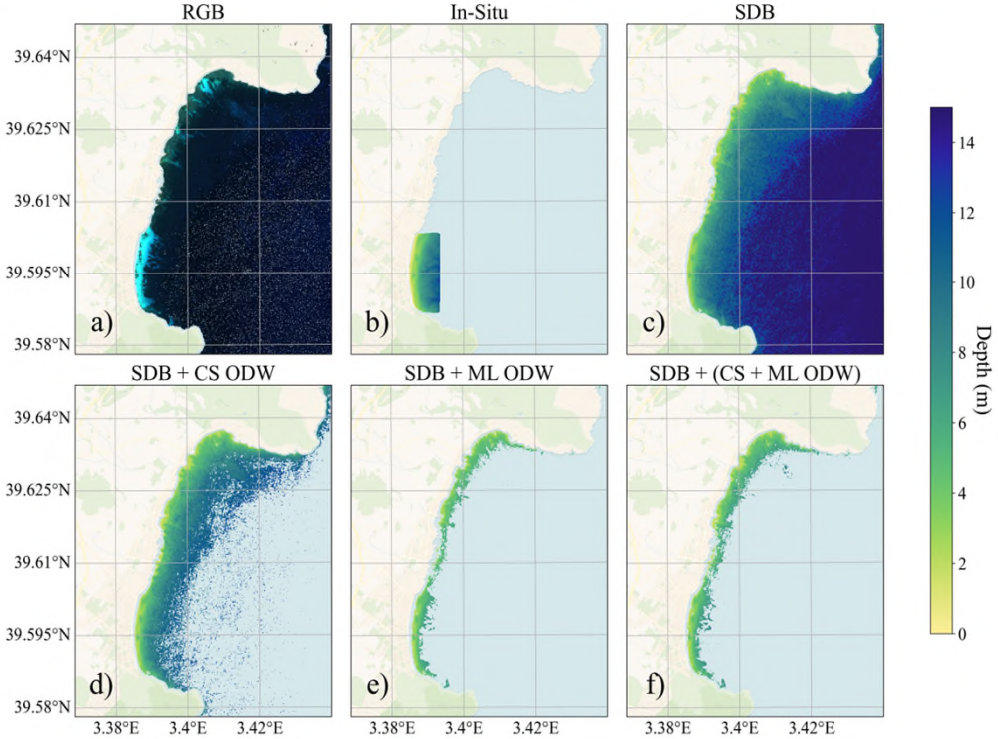
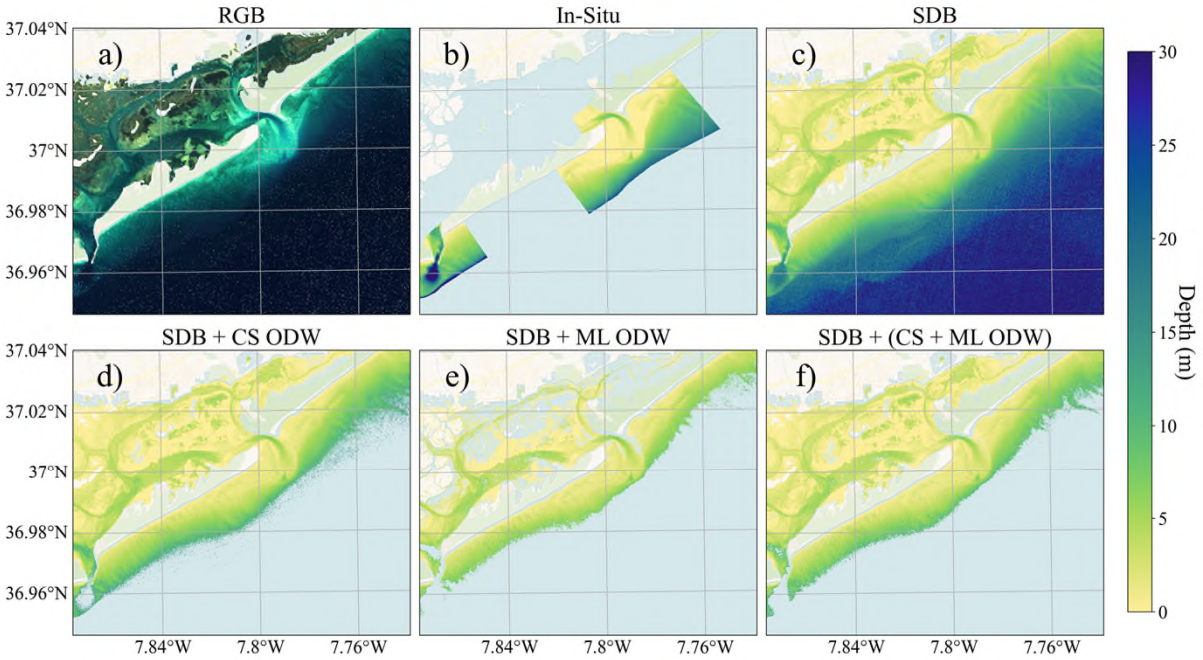
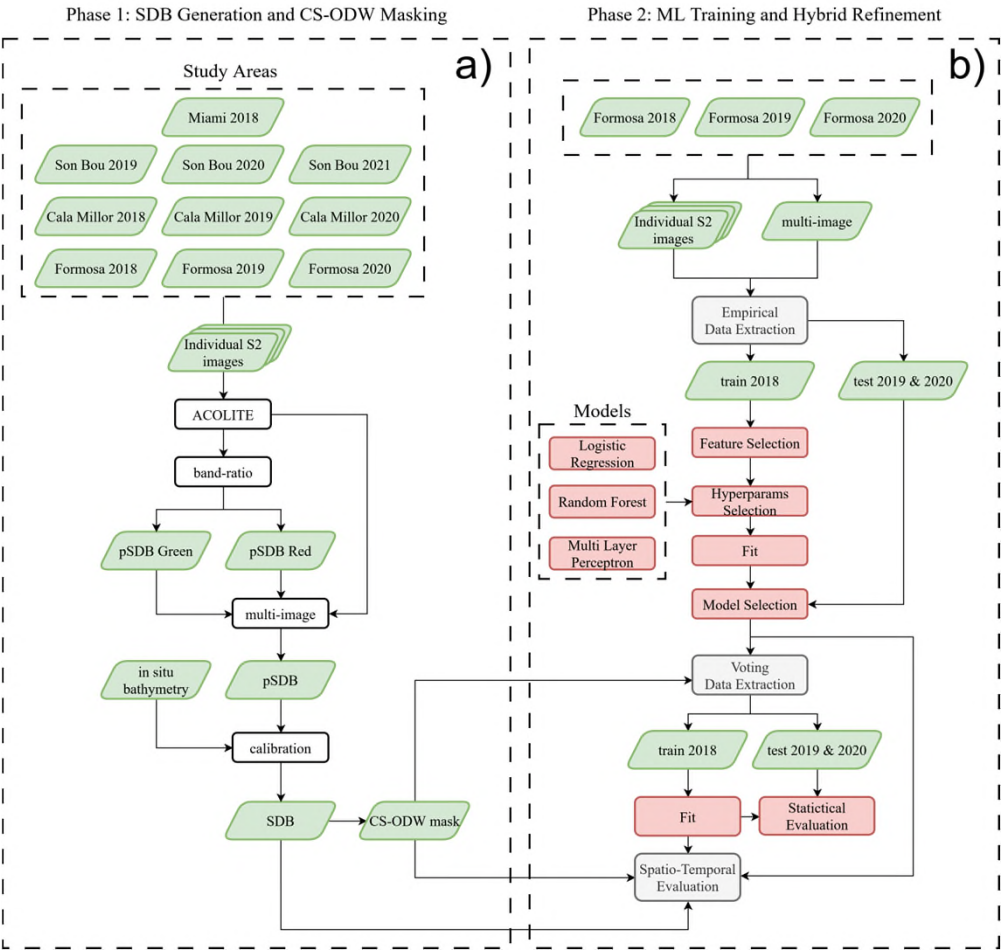
Batimetría estacional: erosión de los bancos marisqueros



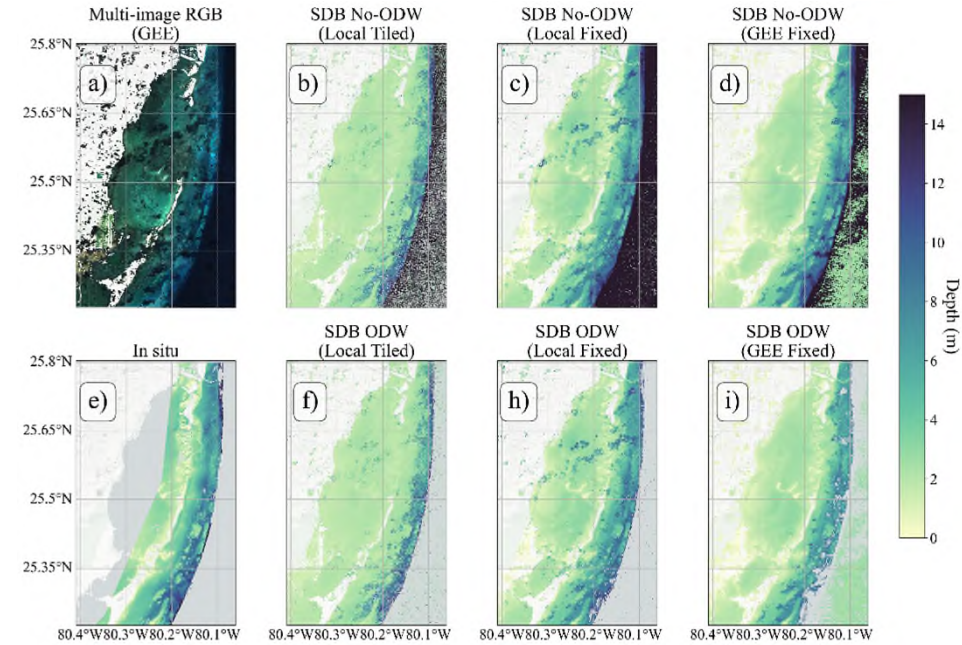
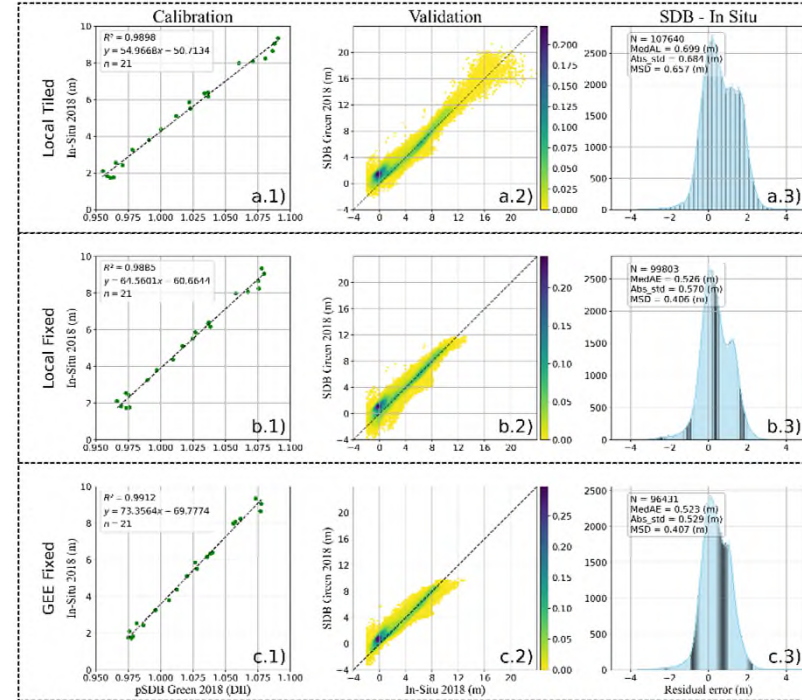
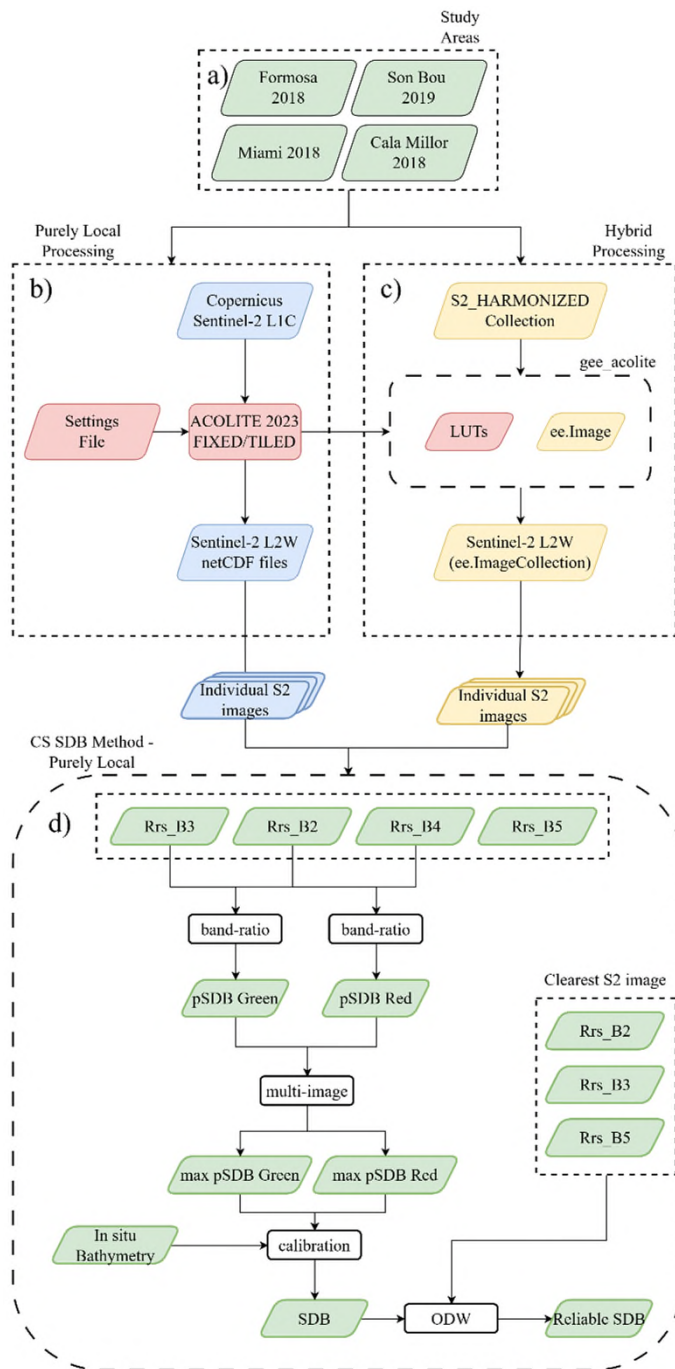
Blending Physical and Artificial Intelligence Models to Improve Satellite-Derived Bathymetry Mapping



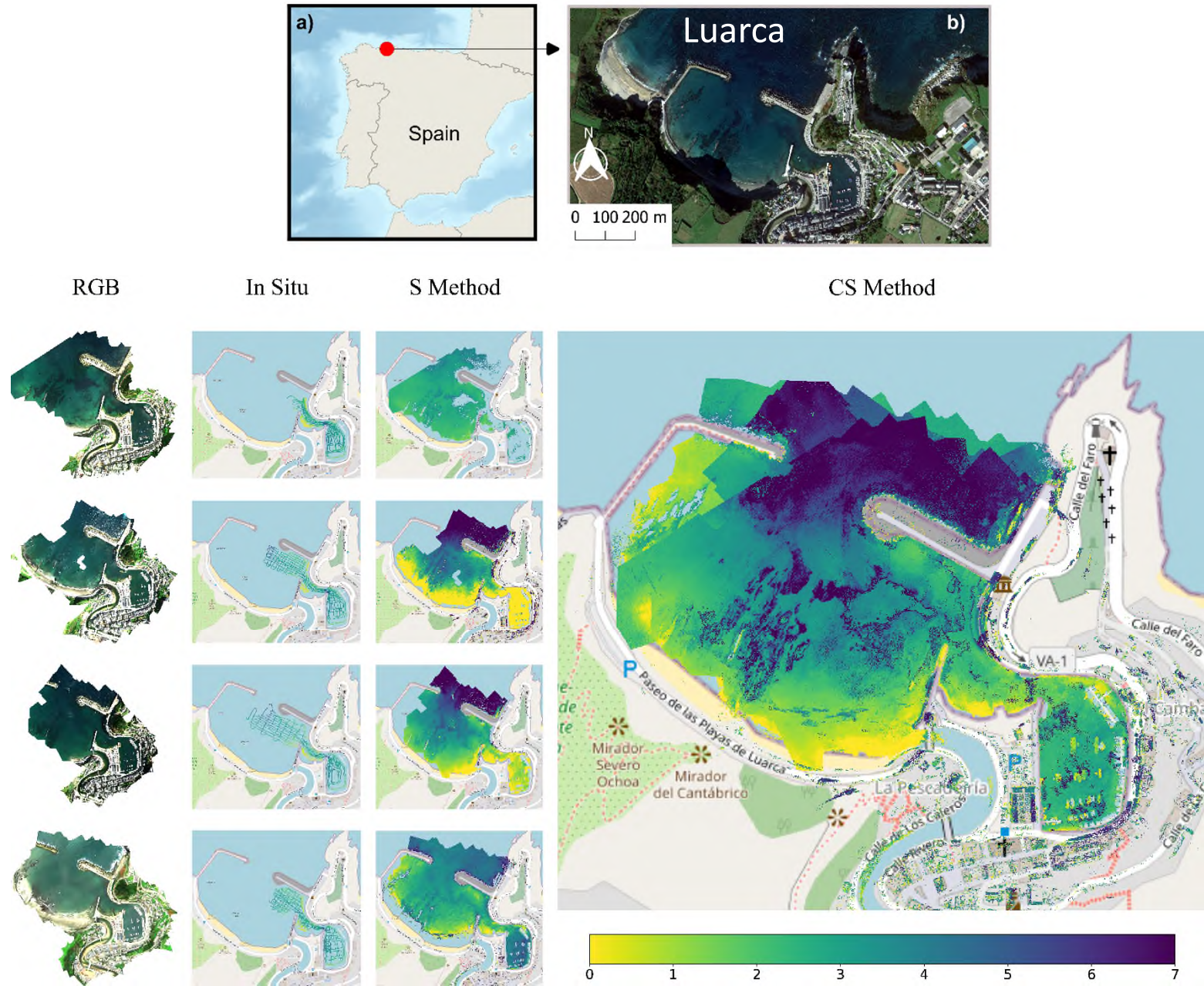
IA para enmascarar aguas ópticamente profundas



SDB en la nube: Google Earth Engine

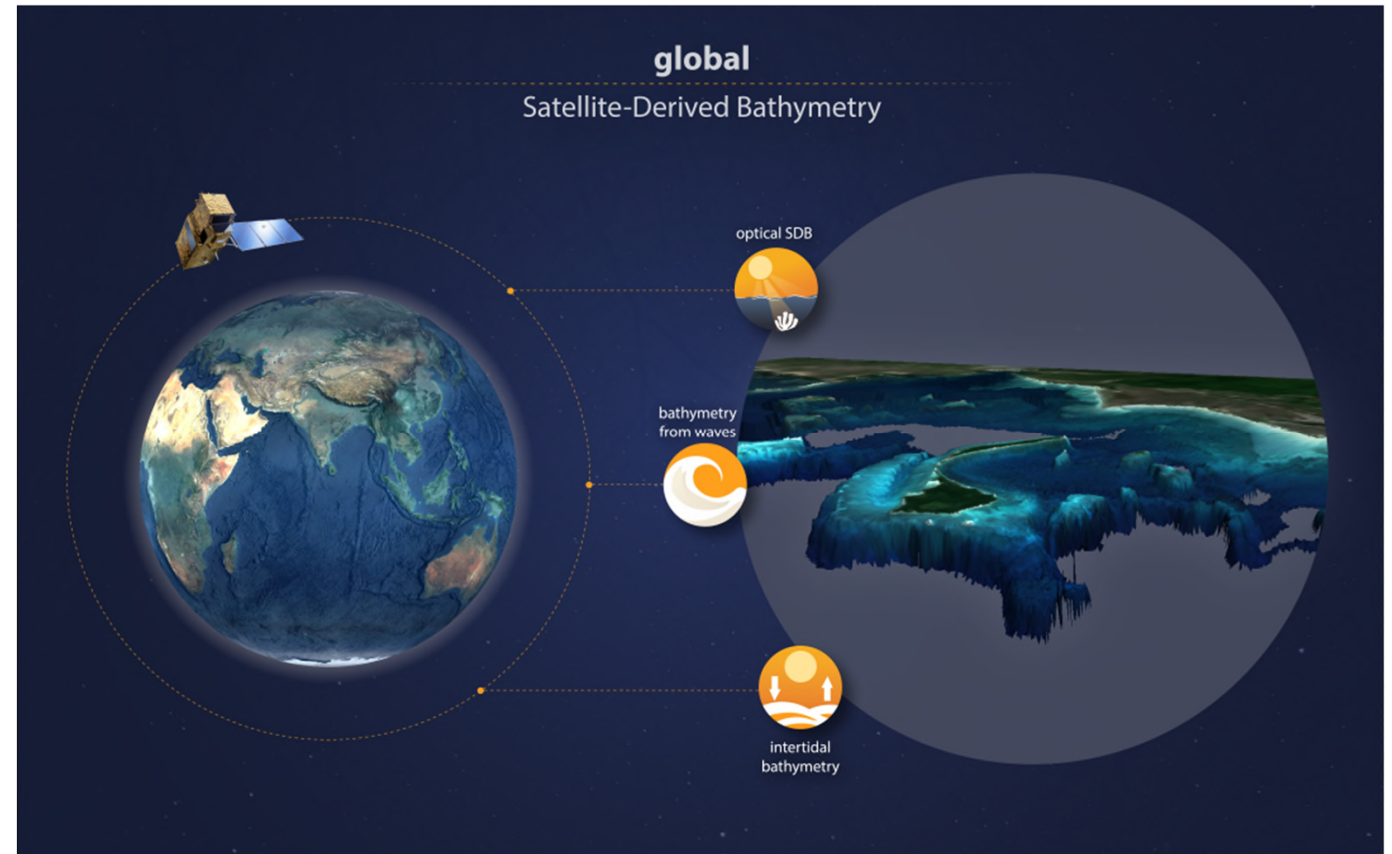
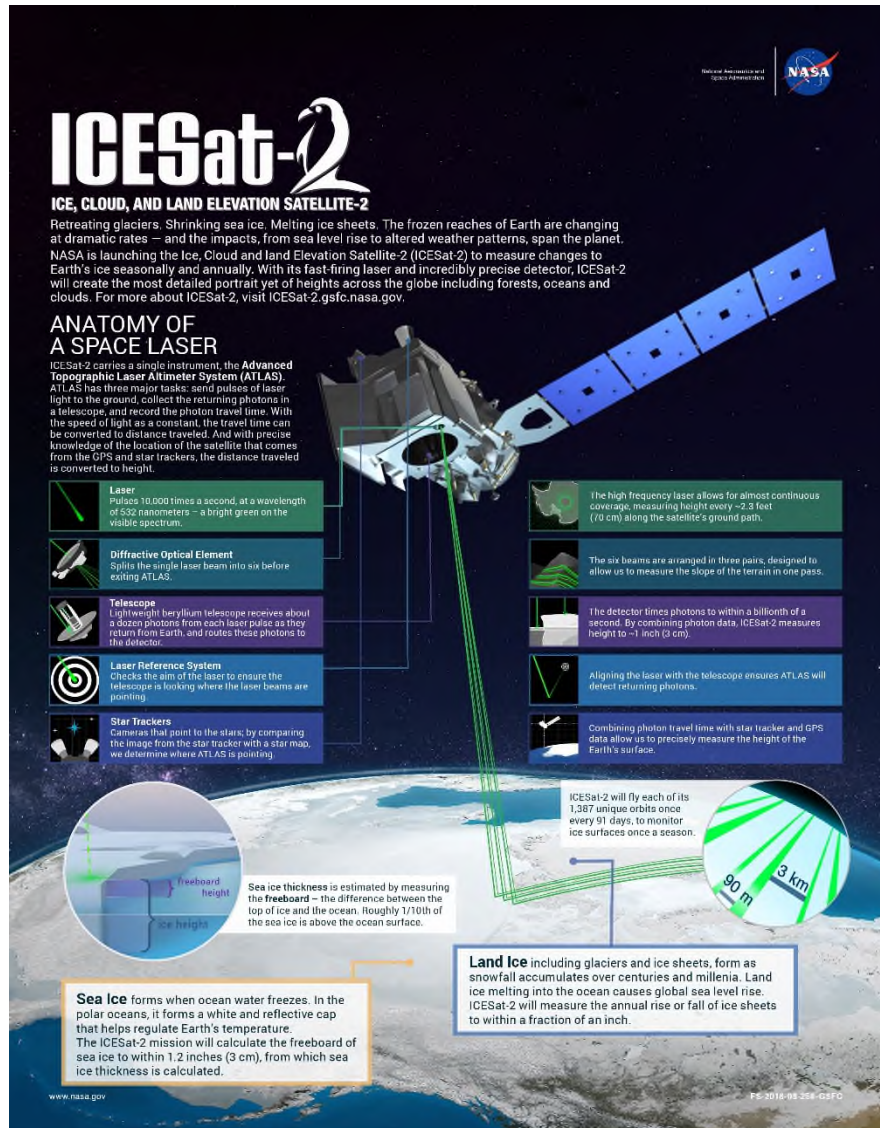


Evaluación comparativa de métodos batimétricos utilizando imágenes multispectrales de muy alta resolución UAVs



Siguientes pasos

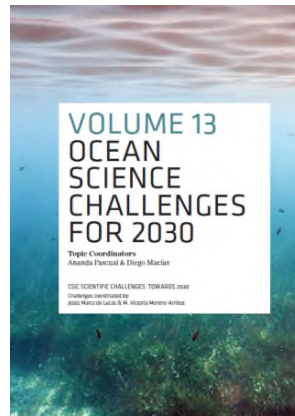
La combinación de ICESat-2 (NASA) y Sentinel-2 (ESA) potencia el mapeo de SDB al fusionar altimetría láser de alta precisión con imágenes multispectrales detalladas



An aerial photograph of a river delta, likely the Amazon, showing a complex network of channels and islands. The water is a deep blue, while the sediment-laden areas are a lighter, milky blue. The land is dark brown and green. A semi-transparent grey rectangular box is centered over the image, containing white text.

¿Alguien (aun) duda del potencial de Sentinel-2 como línea de trabajo indispensable y preferente para avanzar en la cartografía somera a nivel global?

- Avanzar en el conocimiento científico-técnico para entender el impacto del **cambio climático** en el **océano costero**
- Apoyar las estrategias de **intervención y protección** de los **océanos y las costas** con el fin de dar respuesta a los **nuevos retos sociales** en un contexto de **cambio global**





CSIC

32,8 mil posts



CSIC @CSIC · 32min

Siguiendo



Isabel Caballero del @ICMAN_CSIC primera científica española galardonada con el Premio a la Excelencia en Observación de la Tierra de la @esa

Un reconocimiento al desarrollo de herramientas satelitales para monitorizar ecosistemas costeros

tiny.cc/m3n1101



AZO space.i @AZO_space · 8min



Discover the work of #EOExcellenceAward 2026 winner Isabel Caballero

Her project IMCOAST uses #Copernicus Sentinel-2 data to monitor coastal environments and support their protection

Read more: eoxcellence.com/hall-of-fame/i...

@ICaballero28 @esa #EarthObservation





Muchas gracias



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

CSIC ICMAN

Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía

Isabel.caballero@csic.es



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



AGENCIA
ESTATAL DE
INVESTIGACIÓN



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO