

PROTOCOLOS DE EVALUACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS DESPUÉS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS CASO HURACANES: ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA, RB SEAFLOWER, COLOMBIA.

INFORME FINAL

Productos del convenio 002 del 4 de octubre de 2021 entre Coralina
y la Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe.



Dirección: Adriana Santos Martínez, Dra.

**Coordinación Ecosistemas: Julián Prato Valderrama, Cand. PhD. Coordinación Gestión del Riesgo:
Carolina Velásquez, PhD. Coordinación Logística y Divulgación: Robert Hudgson Reeves, Dr.**

**Equipo Científico Ecosistemas Manglares, Pastos Marinos y Corales
Asesoría Jurídica responsabilidades institucionales y Análisis cartográficos SIG.
Asesoría UNAL – ECOMARES - BLUE INDIGO y CEMARIN**

**San Andrés Isla, 2022
Colombia**



Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago
de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Sede Caribe
Sede Bogotá
Sede Medellín



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Fondo de Compensación Ambiental-FCA

Asesorías y apoyo



**El ambiente
es de todos**

Minambiente



Participantes

CORALINA

Arne Britton, Dr. Director General.
Dahian Mitchell, Dra.
Mishell Taylor, Dra.
Marcelo Diviola, Biólogo

BLUE INDIGO

María Fernanda Maya, Bióloga
Mariana Genecco, Bióloga

ECOMARES

Elvira Alvarado, PhD.
Valeria Pizarro, PhD.
Juliana Vanegas, Bióloga

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Sede Caribe

Adriana Santos-Martínez, Dra.
Julian Prato MSc. Cand. PhD.
Carolina Velásquez, PhD.
Robert Hudgson Reves Dr.
Juan David Osorio, PhD.
Fady Ortiz, Dr.
Diana Castaño, Cand. MSc.
Yanelis Cantillo, Bióloga
Juan Carlos Mejía, PhD.
Osmani Castellanos, MSc.
Venus Avendaño, Contadora.
Tishanny Mow, Administradora.
Dianira Calderón Lung, Diseñadora
Salma Tabet, Comunicadora.

Sede Bogotá

Ernesto Mancera, PhD.
Brigitte Gavio, PhD.
Lina Ochoa, Bióloga.
Álvaro Sandoval, Biólogo.
Paola Echeverry, Ingeniera

Sede Medellín

Andrés Osorio, PhD.
Juan Pablo Ramírez Monsalve, Ingeniero
Paula Andrea Espinosa Ordoñez, Ingeniera

Asesorías y apoyo



CONTENIDO GENERAL SECCIONES

Presentación

- I. Gestión del riesgo de desastres basado en ecosistemas**
- II. Competencias y responsabilidades institucionales**
- III. Documento técnico detallado protocolo de restauración ecosistemas de Manglares**
- IV. Documento técnico detallado protocolo de restauración ecosistemas de Pastos Marinos**
- V. Documento técnico detallado protocolo de restauración ecosistemas de Arrecifes de coral**
- VI. Participación social para la gestión del riesgo en ecosistemas marinos**
- VII. Documento síntesis protocolos de restauración ecosistemas frente a huracanes (procedimientos restauración manglares, pastos marinos y corales).**
- VIII. Herramientas para la divulgación del conocimiento, Infografías y libros.**

Anexo 1. Mapas de áreas susceptibles a impactos por huracanes.

Anexo 2. Segundo Informe de avance, información secundaria disponible.

Protocolos de evaluación y restauración de ecosistemas después de eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia

ANEXO 1

Mapas de áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes - Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Julián Prato¹, Juan Carlos Mejía¹, Paola Echeverry², Adriana Santos-Martínez¹

Modelación oleaje realizada por:

Andrés Fernando Osorio³, Juan Pablo Ramírez³, Paula Espinosa³, Sup. Juan David Osorio¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, ²Dirección General Marítima-DIMAR, ³Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.



Mapas áreas susceptibles a impacto por huracanes oleaje, San Andrés. Elaborados por Juan Carlos Mejía.

Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés,
Providencia y Santa Catalina, Coralina.
San Andrés isla
2022

Tabla de contenido

1. Mapas de áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes - Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.....	9
1.1. Criterios tomados en cuenta para la elaboración de los mapas de ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes:	10
1.1.1. Características propias de los ecosistemas:	10
1.1.2. Ubicación del ecosistema, factor profundidad:	10
1.2. Ubicación del ecosistema respecto a barreras naturales y respecto a la trayectoria del evento ciclónico:	12
1.2.1. Ubicación del ecosistema respecto a barreras naturales:	12
1.2.2. Ubicación del ecosistema respecto a la trayectoria del evento ciclónico:	12
1.3. Mapas de áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes - Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	16
2. Mapas San Andrés.....	18
3. Mapas Providencia y Santa Catalina	31
4. Referencias.....	45

Tabla de Figuras

Figura 1. Ejemplos para ilustrar de manera simplificada el sentido de la rotación de los vientos de huracanes en el Caribe (huracán Iota, 2020). Los puntos verde y amarillo simbolizan dos posibles posiciones de islas hipotéticas (Norte y Sur) respecto al ojo del huracán. Las flechas rojas simbolizan la dirección del viento.	14
Figura 2. Ubicación de dos islas hipotéticas (punto amarillo al sur del centro y verde al norte del centro) respecto a la trayectoria (línea negra) del centro de un huracán (ojo del huracán) u evento ciclónico.	15
Figura 3. Ejemplos simplificados de oleaje predominante asociado a trayectorias de huracanes con centro (ojo) pasando por el (A) Norte de la Isla de San Andrés, y (B), Sur de la Isla.	15
Figura 4. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.	19
Figura 5. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con batimetría.	20
Figura 6. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.	21
Figura 7. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.	22
Figura 8. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría.	23
Figura 9. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.	24
Figura 10. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.	25
Figura 11. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital con batimetría.	26
Figura 12. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.	27

Figura 13. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural..	28
Figura 14. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría- ..	29
Figura 15. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.	30
Figura 16. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.	32
Figura 17. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría.....	34
Figura 18. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.	35
Figura 19. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.	36
Figura 20. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital con batimetría.	37
Figura 21. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.....	38
Figura 22. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.	39
Figura 23. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría.....	40

Figura 24. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.....	41
Figura 25. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.....	42
Figura 26. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital con batimetría.....	43
Figura 27. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.....	44

1. Mapas de áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes - Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Los ecosistemas de manglares, pastos marinos y arrecifes de coral de la RB Seaflower son vitales para el bienestar de las personas que habitan las islas, especialmente por los servicios ecosistémicos que aportan para la seguridad de la vida humana, la seguridad alimentaria y la economía. Luego de un evento ciclónico ya sea una tormenta tropical o huracán, es de gran importancia poder actuar con prontitud y efectividad. Debido que los recursos tanto financieros, como de personal y de tiempo son limitados, es muy importante poder enfocar los esfuerzos de evaluación de daños y restauración a ciertas áreas preestablecidas basados en información disponible, sobretudo en territorios marítimos tan amplios como es el caso de las Islas del Archipiélago, haciendo más eficiente las acciones de respuesta.

Como parte de las herramientas de optimización de recursos (tiempo, dinero, personal) para una respuesta rápida y más eficiente para la restauración de ecosistemas, se desarrollaron mapas de las posibles áreas más susceptibles a ser impactadas por huracanes en San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Estos mapas contribuyen a ubicar de manera previa aquellos **sitios que pueden verse más afectados según varios criterios** como la ubicación, exposición, elementos expuestos, tipo de ecosistema, tipo de evento ciclónico y trayectoria del evento ciclónico. Esta herramienta cartográfica puede ser consultada antes y después del evento ciclónico para planificar espacialmente las acciones primarias de evaluación de daños y restauración (primeros auxilios para el ecosistema).

Lo anterior, debe ser complementado, teniendo en cuenta también las áreas priorizadas por las comunidades de San Andrés y Providencia de aquellos ecosistemas que consideran prioritarios dada su importancia para su bienestar, debido a los servicios ecosistémicos que prestan a la comunidad por ejemplo, la protección costera proporcionada por manglares que protegen zonas pobladas (como Johnes Point y Santa Catalina en Providencia, o Sound Bay en San Andrés), que aporta la barrera arrecifal (como el sector del centro y playa de Spratt Bight en San Andrés, y el costado Este de las Islas de Providencia y San Andrés), o el servicio de provisión de alimentos de corales, pastos marinos y manglares en zonas específicas.

Las herramientas cartográficas con las áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes fueron determinadas articulando tres insumos principales: **1. Resultados de modelaciones del oleaje en diferentes escenarios** asociados a vientos de huracanes categoría 1 (vientos de 110 km/h) y categoría 5 (vientos de 250 km/h) con

dirección del oleaje desde origen Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste y Noroeste, para un total de 32 escenarios. **2. Datos de profundidad (batimetría)**, para tener en cuenta la exposición de los sitios y ecosistemas, entendiendo que a menor profundidad el impacto del oleaje puede ser mayor. **3. Ubicación de los ecosistemas** según información disponible en la Corporación Coralina. Con estos insumos obtenidos mediante un equipo de trabajo interdisciplinario, se realizaron análisis, cruces de información y archivos *shape* para obtener los “Mapas de áreas susceptibles a impactos por huracanes” presentados a continuación y disponibles en alta resolución en el Anexo 1 y en archivos de imagen individuales.

1.1. Criterios tomados en cuenta para la elaboración de los mapas de ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes:

1.1.1. Características propias de los ecosistemas:

Los ecosistemas marinos y costeros como los arrecifes de coral y pastos marinos son vulnerables a condiciones extremas de oleaje, viento, salinidad, turbidez y corrientes, según corresponda, junto a **características propias asociadas a la biología** de los organismos que componen el ecosistema como la forma de crecimiento, especie y densidad del exoesqueleto para el caso de los corales, la altura de los árboles, especie y tolerancia a la salinidad para el caso de los manglares, y la especie, forma de crecimiento y propiedades de las raíces para el caso de los pastos marinos. Estas condiciones se consideran y desarrollan en mayor detalle en las secciones III, IV y V correspondientes a los documentos técnicos de protocolos de restauración particulares para cada ecosistema.

De esta manera los manglares son más susceptibles a vientos extremos por estar sobre la superficie, al fuerte oleaje que pueda generar erosión o exceso de sedimentación afectando el normal flujo de agua o dinámicas hidrológicas, y al exceso de salinidad que pueda causar posibles inundaciones por mareas de tormentas y oleaje extremo por huracanes. Los corales y pastos marinos, son más susceptibles al desprendimiento, ruptura y fraccionamiento generados por el fuerte oleaje y/o por el impacto de elementos sólidos como escombros arrastrados por el viento o las olas durante los huracanes, así como por la erosión o exceso de sedimentación generados por las lluvias, oleaje extremo y corrientes asociados a los huracanes. De acuerdo a esto, se reconoce que el fuerte **oleaje** causado por los huracanes o tormentas tropicales es una de los principales factores que pueden afectar los ecosistemas teniendo en cuenta la fuerza (relacionada a la altura de las olas que se generen) y la dirección.

1.1.2. Ubicación del ecosistema, factor profundidad:

Otro factor fundamental es **la profundidad** a la que se encuentre cierto ecosistema, dado a que a mayor profundidad es menor la fuerza o energía del oleaje que impacte dicho lugar y

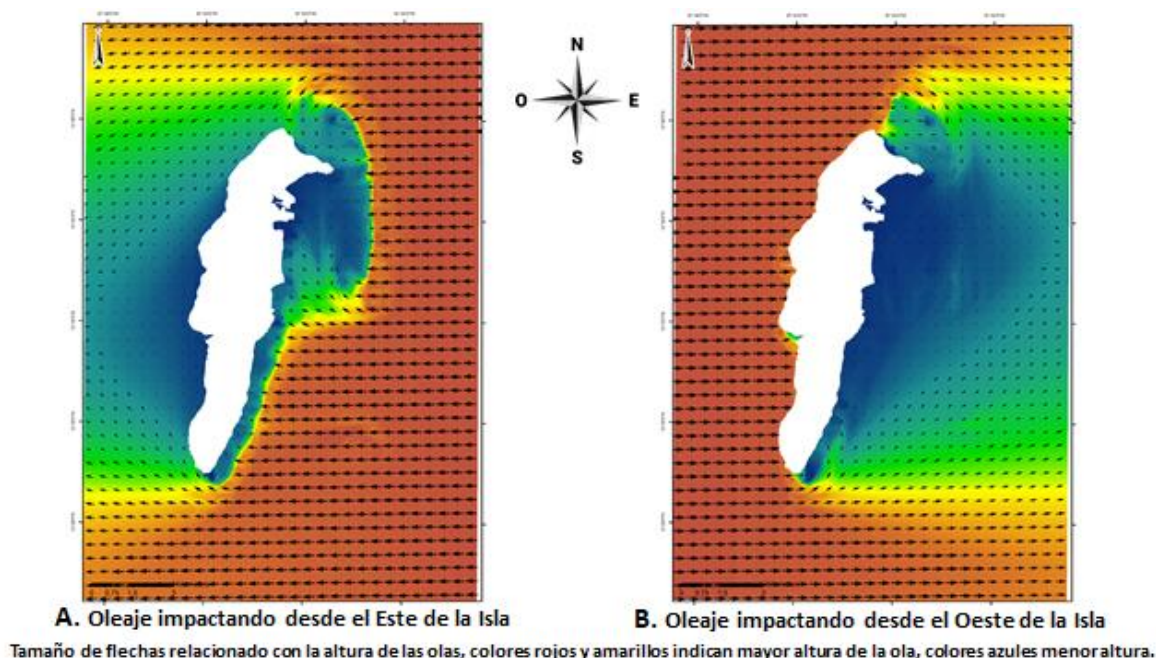
por lo tanto esto hace que haya zonas más “protegidas” al ser más profundas. Lo anterior es también relativo a la altura de las olas, dado que olas más pequeñas o de menor altura impactan en zonas más someras con muy poco efecto en zonas más profundas, y olas más “grandes” o con mayor altura pueden impactar el fondo a mayor profundidad. Existen múltiples factores que influyen en esta relación, sin embargo, por motivos prácticos para intentar ilustrar la proporción de esta relación, se puede considerar una relación de entre la profundidad a la que rompen las olas y la altura del oleaje en la rompiente alrededor de 0,78, relación dada por McCowan (1981), es decir que olas de 7 metros de altura (H_s) estarían rompiendo a 10 m de profundidad impactando considerablemente el fondo. Por otro lado, olas de 1 m de altura (H_s) pueden estar rompiendo a una profundidad de 1,5 m impactando el fondo en mayor medida desde dicha profundidad, sin tener mayor efecto a una profundidad de 10 m, por ejemplo. Cabe mencionar que existen complejas teorías hidrodinámicas para los criterios de rotura que incluyen diferentes pendientes y otros factores, con las consecuentes variaciones en los rangos de esta relación de la altura del oleaje en rompiente y la profundidad (Sierra y Lo Presti, 1998), en las que no entraremos en detalle en esta sección. Como se mencionó, la relación presentada es en cuanto a la profundidad de la rompiente del oleaje, a la cual se transmite la mayor cantidad de energía del oleaje, pero los efectos del oleaje pueden afectar un poco más profundo debido a otros factores del oleaje mismo o de efectos indirectos como el movimiento de escombros en el fondo. Para tener en cuenta esto, se tuvo en cuenta observaciones en campo realizadas en San Andrés luego del huracán Iota y los registros de altura del oleaje reportados, en este caso de manera general, para el costado Oeste de San Andrés, se reportaron olas de entre 4 y 7 m de altura y se observaron afectaciones desde los 15 m de profundidad (Prato, obs. Pers. 2021)

Según observaciones realizadas mediante buceo SCUBA durante muestreos de investigadores de la Universidad Nacional de Colombia Sede Caribe en San Andrés, se encontró que luego del huracán Iota, los arrecifes del costado Oeste de la Isla de San Andrés fueron los más afectados (dada la trayectoria del huracán pasando al Norte de San Andrés, lo cual genera vientos y oleaje predominantes del Oeste). De estos arrecifes la zona más somera 0-3 m de profundidad, quedó totalmente devastada, la zona de 5 a 10 m de profundidad presentó una afectación alta, la zona entre 10 y 15 m de profundidad presentó afectación media, mientras que los arrecifes a profundidades mayores a 15 metros no presentaron afectación o tuvieron afectación baja (Prato, obs. Pers. 2021).

1.2. Ubicación del ecosistema respecto a barreras naturales y respecto a la trayectoria del evento ciclónico:

1.2.1. Ubicación del ecosistema respecto a barreras naturales:

La exposición al oleaje por eventos ciclónicos depende también de la **ubicación** de un ecosistema en particular respecto a otras barreras naturales como las Islas (territorio emergido) o las barreras de coral, que pueden disminuir la energía del oleaje hasta en un 90% y/o del viento hasta en un 86% para el caso de los manglares (Prato et al., 2020). De esta manera si el viento y oleaje extremos vienen principalmente desde el Oeste (Occidente) de las Islas, esa área será la de mayor afectación, mientras que la parte Este de las Islas estaría más “protegida” dado a la presencia de la Isla. Mientras que, si el oleaje y viento se aproximan a las islas desde el Este principalmente, los ecosistemas a ese costado estarán más expuestos al viento y oleaje extremo, quedando el costado Oeste más “protegido” por la presencia de la Isla.



Dado que las Islas del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina poseen barreras arrecifales al costado Este (Oriental) de cada Isla, se cuenta con una protección provista por estas barreras naturales que pueden disminuir considerablemente la altura de las olas (Coralina-Invemmar, 2012; Prato et al., 2020).

1.2.2. Ubicación del ecosistema respecto a la trayectoria del evento ciclónico:

Debido a la naturaleza de los ciclones tropicales en el hemisferio Norte, en el que se encuentra el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, el sentido de rotación de los vientos alrededor del ojo (centro del huracán) es en sentido anti horario, es

decir en contra del sentido de rotación de las manecillas del reloj (Recuperado el 10 de junio de 2022 de <https://www.nhc.noaa.gov/climo/?text>). Los ciclones tropicales tienen varias categorías según la velocidad del viento, empezando por las depresiones tropicales (evento ciclónico con vientos hasta 61 km/h o 33 nudos), tormentas tropicales (vientos entre 34 y 63 nudos, 62 km/h a 116 km/h), Huracanes (vientos con velocidades mayores a 64 nudos ó 118 km/h), Huracanes Mayores (categorías 3, 4 y 5, velocidades del viento mayores a 96 nudos ó 177 km/h).

Para Atlántico, en especial **para la ubicación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina**, los **meses de mayor actividad ciclónica son septiembre, octubre y noviembre**, según análisis de las trayectorias de huracanes en los últimos 100 años presentadas por el National Hurricane Center de la noaa (Recuperado el 10 de junio de 2022 de <https://www.nhc.noaa.gov/climo/?text>).

Debido al sentido de rotación anti horario de los ciclones tropicales, la trayectoria del huracán respecto a cada isla u área en particular del Archipiélago, resulta de gran importancia tanto para la gestión del riesgo, preparación y prevención, como para la respuesta. Así mismo esta ubicación de las islas relativas a la trayectoria del centro (ojo) del huracán, es clave para identificar aquellas zonas que pueden verse más afectadas en un escenario particular. A continuación en la Figura 1, se ilustra el sentido de rotación y dirección principal de los vientos cercanos a la tierra o el mar. Las flechas rojas ilustran en sentido del viento, los puntos de color verde y amarillo representan dos ubicaciones o islas hipotéticas respecto al centro (verde al norte del ojo del huracán, amarillo al sur de ojo del huracán). Con esta ilustración es posible observar el sentido predominante en que impactará el viento y oleaje para cada caso (verde o amarillo).

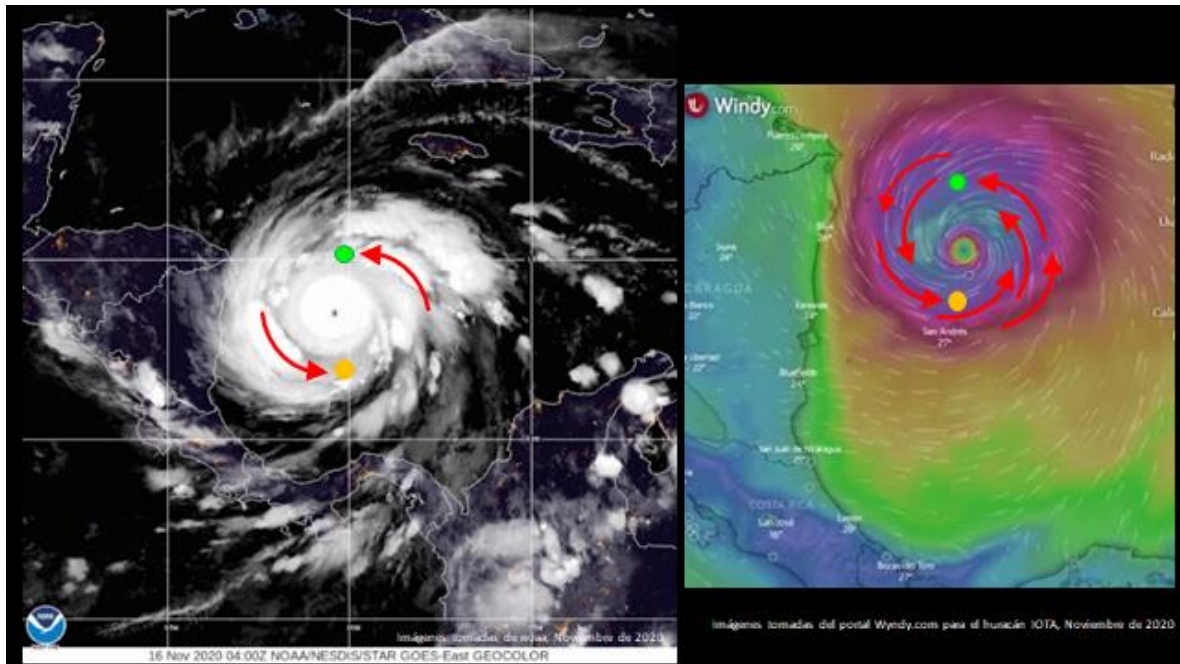
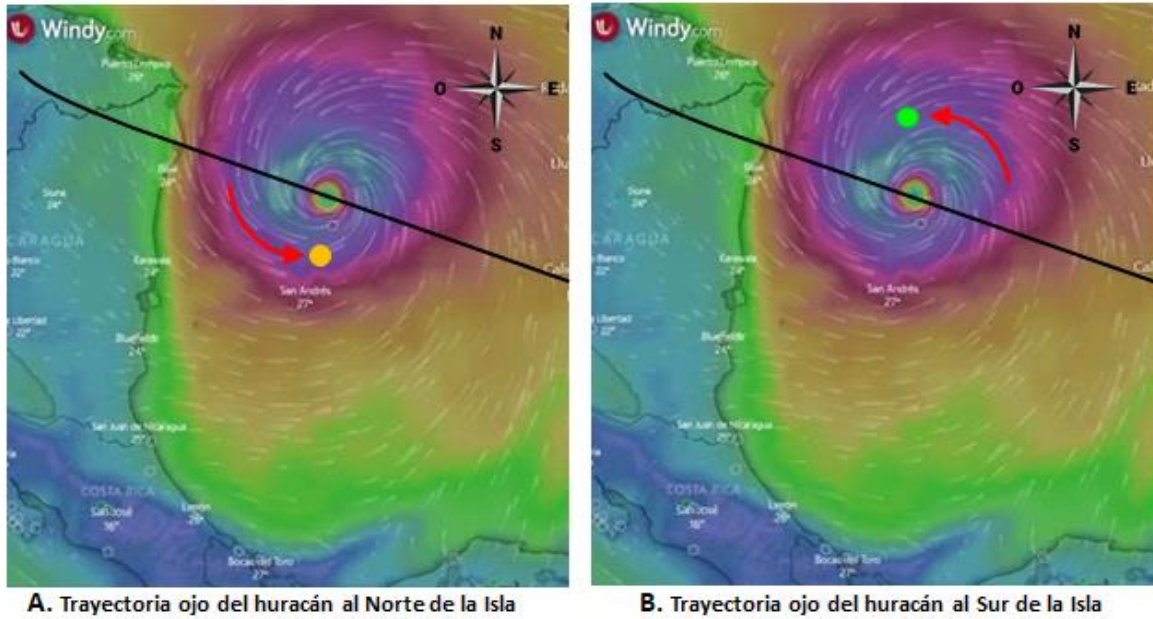


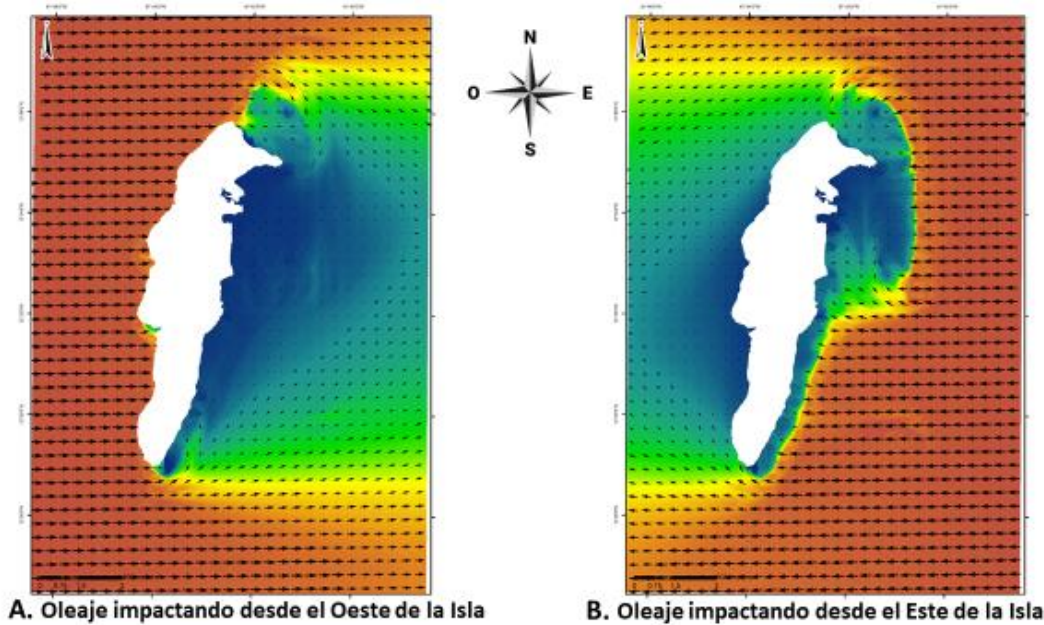
Figura 1. Ejemplos para ilustrar de manera simplificada el sentido de la rotación de los vientos de huracanes en el Caribe (huracán Iota, 2020). Los puntos verde y amarillo simbolizan dos posibles posiciones de islas hipotéticas (Norte y Sur) respecto al ojo del huracán. Las flechas rojas simbolizan la dirección del viento.

En la Figura 2, se observan dos posibles casos: En la imagen de la derecha (A) la trayectoria (línea negra) del centro del huracán pasa por el Norte de la isla hipotética amarilla (punto amarillo al Sur del ojo del huracán), para este caso la dirección principal del viento y oleaje causados por el huracán impactarían principalmente desde el Oeste (West, Occidente). En este caso la zona Oeste de la Isla Amarilla y los ecosistemas localizados a ese costado de la Isla, estarían más expuestos a fuertes vientos y oleaje asociados al evento ciclónico que impactarían de manera predominante desde el Oeste como se presenta en la imagen A de la Figura 3.



Imágenes tomadas del portal Windy.com para el huracán IOTA, Noviembre de 2020

Figura 2. Ubicación de dos islas hipotéticas (punto amarillo al sur del centro y verde al norte del centro) respecto a la trayectoria (línea negra) del centro un huracán (ojo del huracán) u evento ciclónico.



Tamaño de flechas relacionado con la altura de las olas, colores rojos y amarillos indican mayor altura de la ola, colores azules menor altura.

Figura 3. Ejemplos simplificados de oleaje predominante asociado a trayectorias de huracanes con centro (ojo) pasando por el (A) Norte de la Isla de San Andrés, y (B), Sur de la Isla.

Por otro lado, en B en las Figura 2 y Figura 3 la trayectoria del centro del huracán o ciclón tropical pasa por el Sur de la isla hipotética verde (punto verde al Norte del ojo del huracán), en este caso los vientos y oleaje impactarían desde el Este (East, Oriente) de la Isla.

Protocolo de evaluación y restauración de ecosistemas después de eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia. Informe Final a CORALINA. Por UNAL Sede Caribe, Bogotá, Medellín. Asesoría UNAL, ECOMARES, BLUE INDIGO y CEMARIN, San Andrés - 2022

Lo anterior es de manera simplificada e ilustrativa para comprender de manera sencilla los comportamientos generales de cada caso, sin embargo, los eventos ciclónicos son mucho más complejos y tienen variaciones de acuerdo a las particularidades de su trayectoria y a la ubicación del centro a lo largo de la misma, de manera que durante el paso del ciclón tropical también se pueden presentar vientos y oleaje en direcciones intermedias desde el Norte y hasta el Sur según corresponda para cada caso de vientos y oleaje predominante desde el Este (trayectoria al Sur de la Isla) o desde el Oeste (Trayectoria al Norte de la Isla). Para el caso de trayectoria del centro del huracán pasando directamente sobre una Isla o lugar en particular, se pueden tener combinaciones de los diferentes escenarios de dirección del viento y oleaje y condiciones extremas de velocidad del viento y altura del oleaje.

1.3. Mapas de áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes - Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

De acuerdo a lo presentado previamente, y teniendo en cuenta los criterios presentados, se presentan a continuación los mapas con las áreas de los ecosistemas susceptibles a ser impactados por huracanes - Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, para cuatro (4) escenarios principales relacionados con la trayectoria del centro del ciclón tropical respecto a las Islas y a la intensidad del evento ciclónico (en este caso se realizó para huracán categoría 1 y huracán categoría 5).

Para lograr la elaboración de estos mapas se generaron 32 mapas de oleaje que fueron el resultado de modelaciones de propagación del oleaje usando el modelo numérico Swan (1 para cada tipo de huracán (cat. 1 y cat. 5) en cada una de las direcciones de oleaje predominante (Norte, Noroeste, Oeste, Suroeste, Sur, Sureste, Este, Noreste). Estos mapas se convirtieron a formato *shape* para realizar cruces de capas con la profundidad (batimetría) y ubicación de ecosistemas.

A partir de esta información multicapa, se generaron los mapas presentados a continuación, en los cuales se presentan en flechas rojas aquellos sitios en los que se puede encontrar oleaje con alturas que puedan tener impacto sobre el fondo en relación con la profundidad (olas mayores a 3 m en profundidades menores a 15 m y olas mayores a 1 m en profundidades menores a 5 m), y su ubicación respecto a las Islas usando imágenes satelitales en color natural, respecto a la profundidad (batimetría con isobatas) y a la ubicación de los ecosistemas (capas en distintos colores por tipo de ecosistema) .

Cada mapa incluye 3 posibles direcciones de oleaje asociadas a la dirección general del oleaje para huracanes con trayectoria al norte de la Isla (oleaje predominante proveniente desde el Noroeste, Oeste y Suroeste) y al sur de la isla (oleaje predominante proveniente desde el Sureste, Este y Noreste).

Las flechas rojas simbolizan sitios susceptibles a impacto por oleaje debido a huracanes, en cada caso, más de una flecha superpuesta indica que esa área es susceptible de ser impactada en más de una dirección del oleaje. Mayor cantidad de flechas superpuestas indica mayor susceptibilidad al ser afectada en más de una dirección. A mayor tamaño de las flechas es mayor la altura de las olas y por ende la energía del oleaje.

Los mapas fueron elaborados para las islas de San Andrés y Providencia para huracanes categoría 1 y categoría 5. Los mapas pueden ser también consultados en alta resolución en archivos individuales en gran formato entregados a Coralina como parte del presente informe.

2. Mapas San Andrés

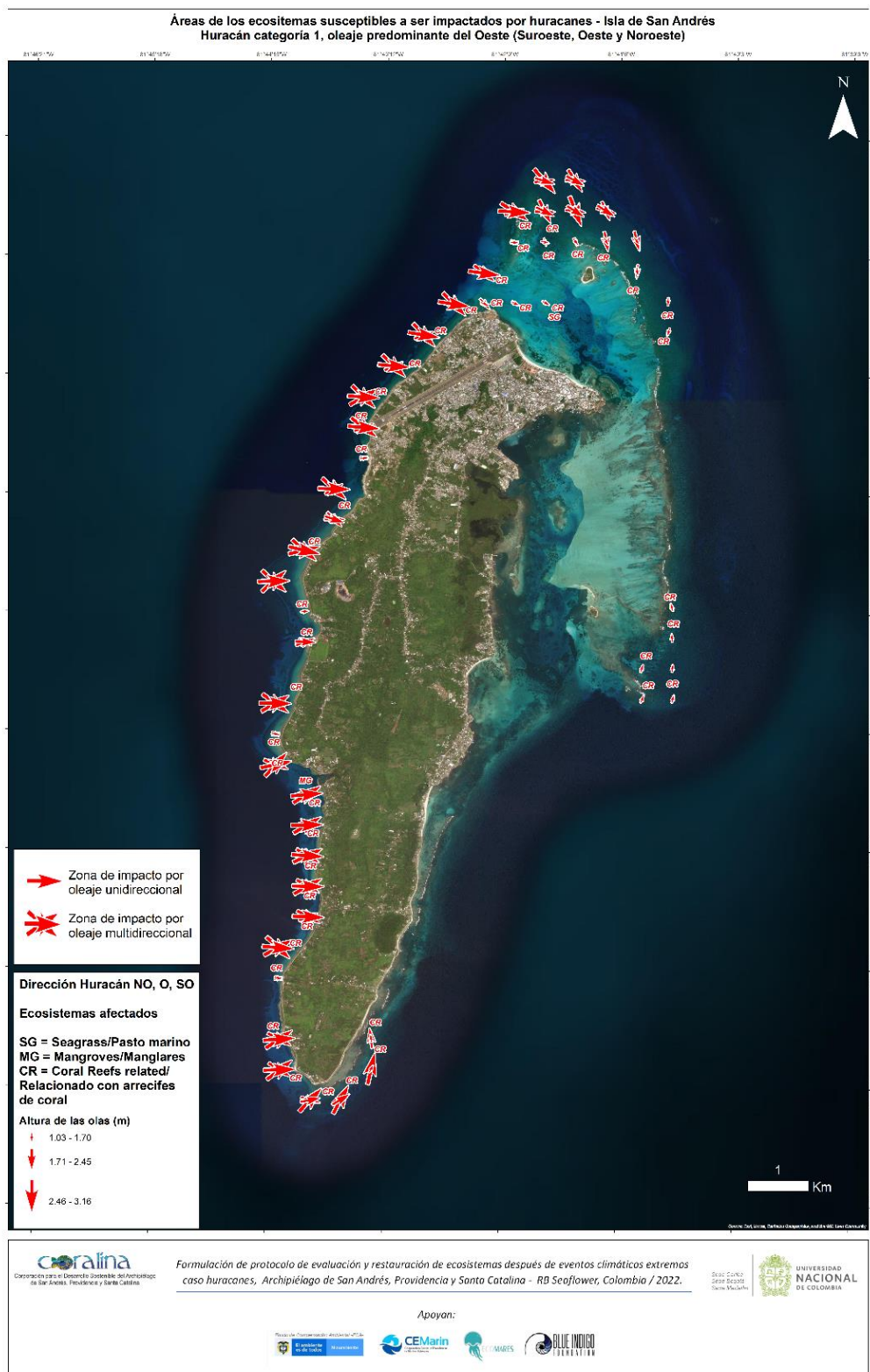


Figura 4. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.

Protocolo de evaluación y restauración de ecosistemas después de eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia. Informe Final a CORALINA. Por UNAL Sede Caribe, Bogotá, Medellín. Asesoría UNAL, ECOMARES, BLUE INDIGO y CEMARIN, San Andrés - 2022

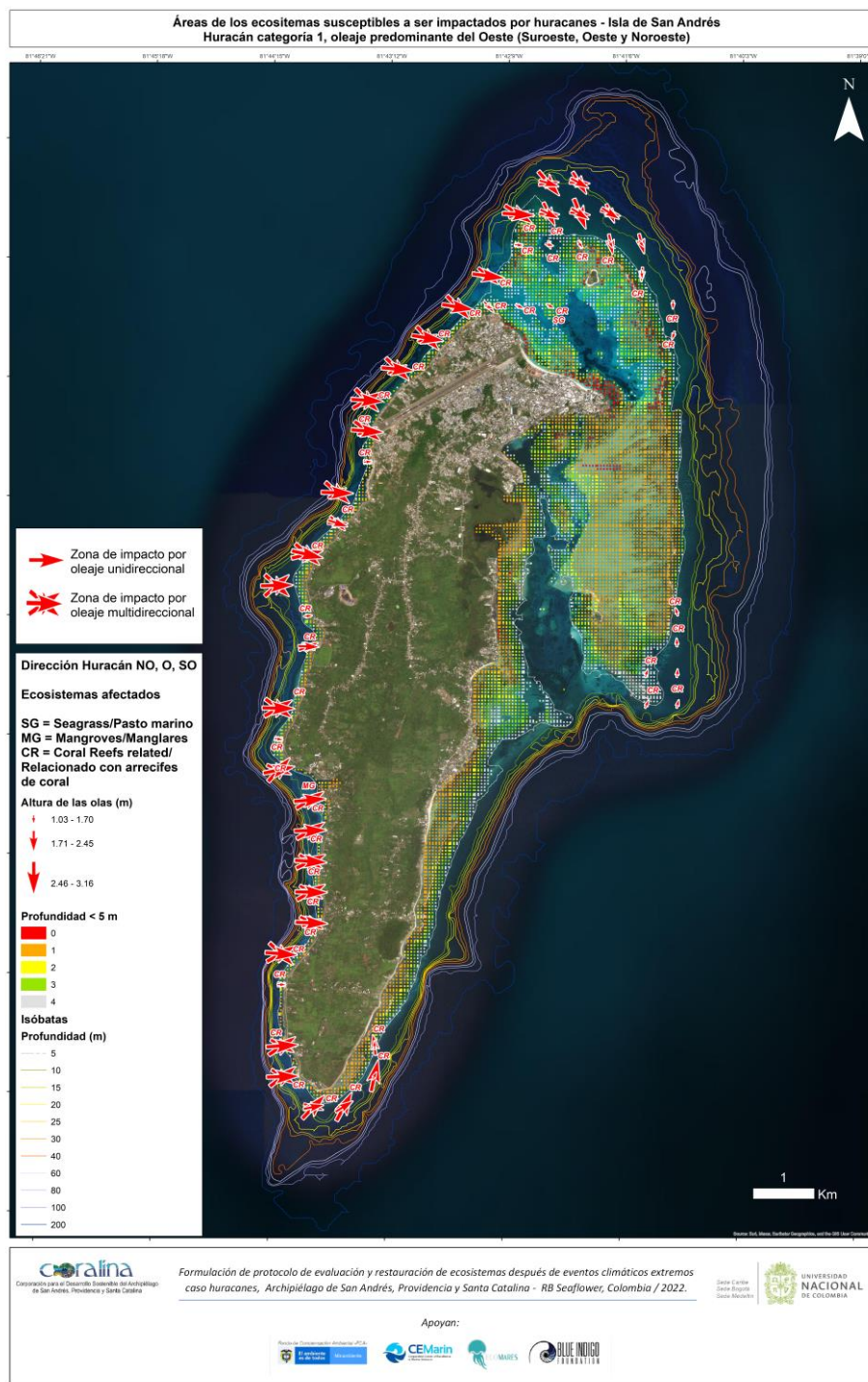


Figura 5. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con batimetría.

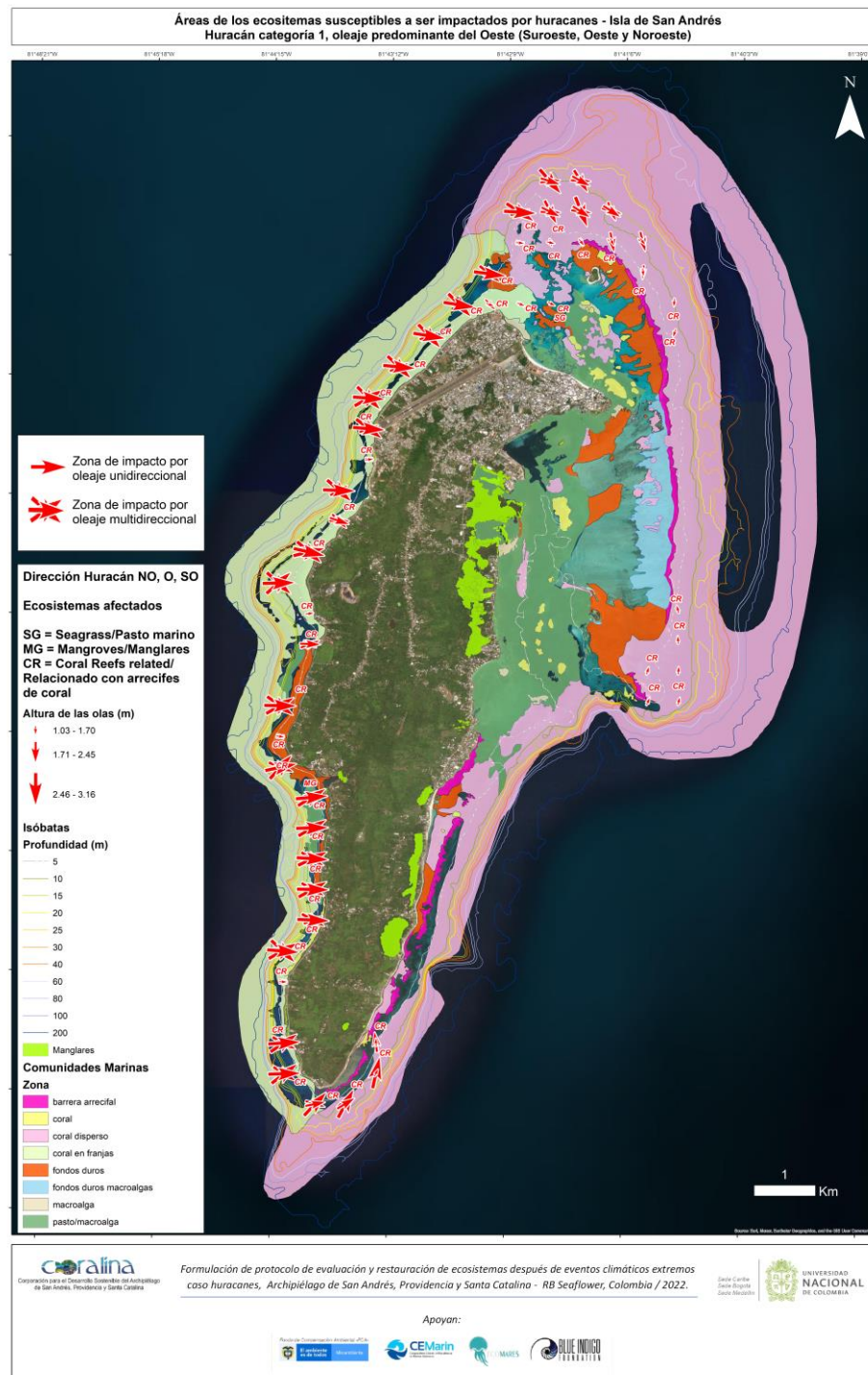


Figura 6. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.

Protocolo de evaluación y restauración de ecosistemas después de eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia. Informe Final a CORALINA. Por UNAL Sede Caribe, Bogotá, Medellín. Asesoría UNAL, ECOMARES, BLUE INDIGO y CEMARIN, San Andrés - 2022

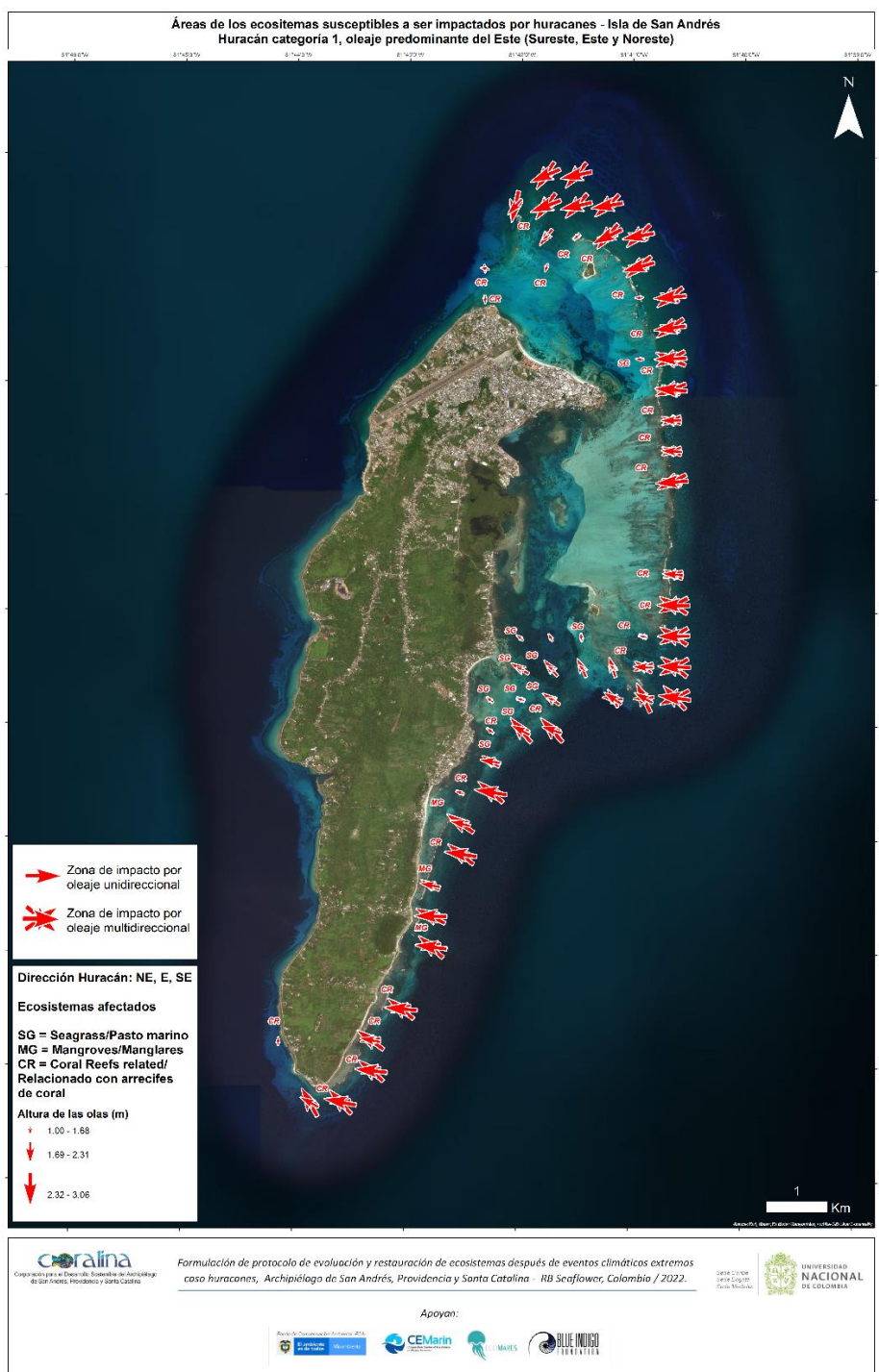


Figura 7. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.

Protocolo de evaluación y restauración de ecosistemas después de eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia. Informe Final a CORALINA. Por UNAL Sede Caribe, Bogotá, Medellín. Asesoría UNAL, ECOMARES, BLUE INDIGO y CEMARIN, San Andrés - 2022

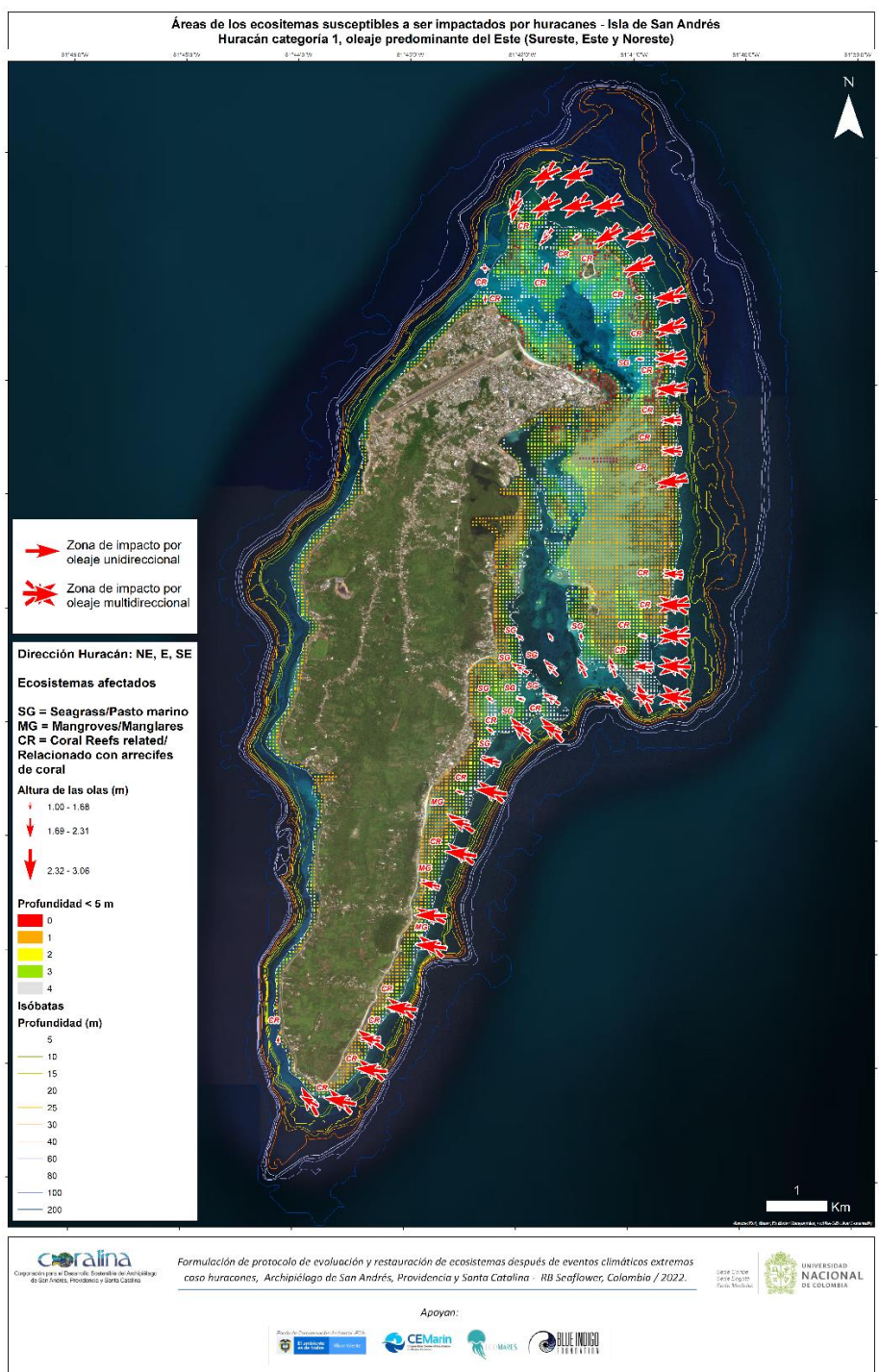


Figura 8. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría.

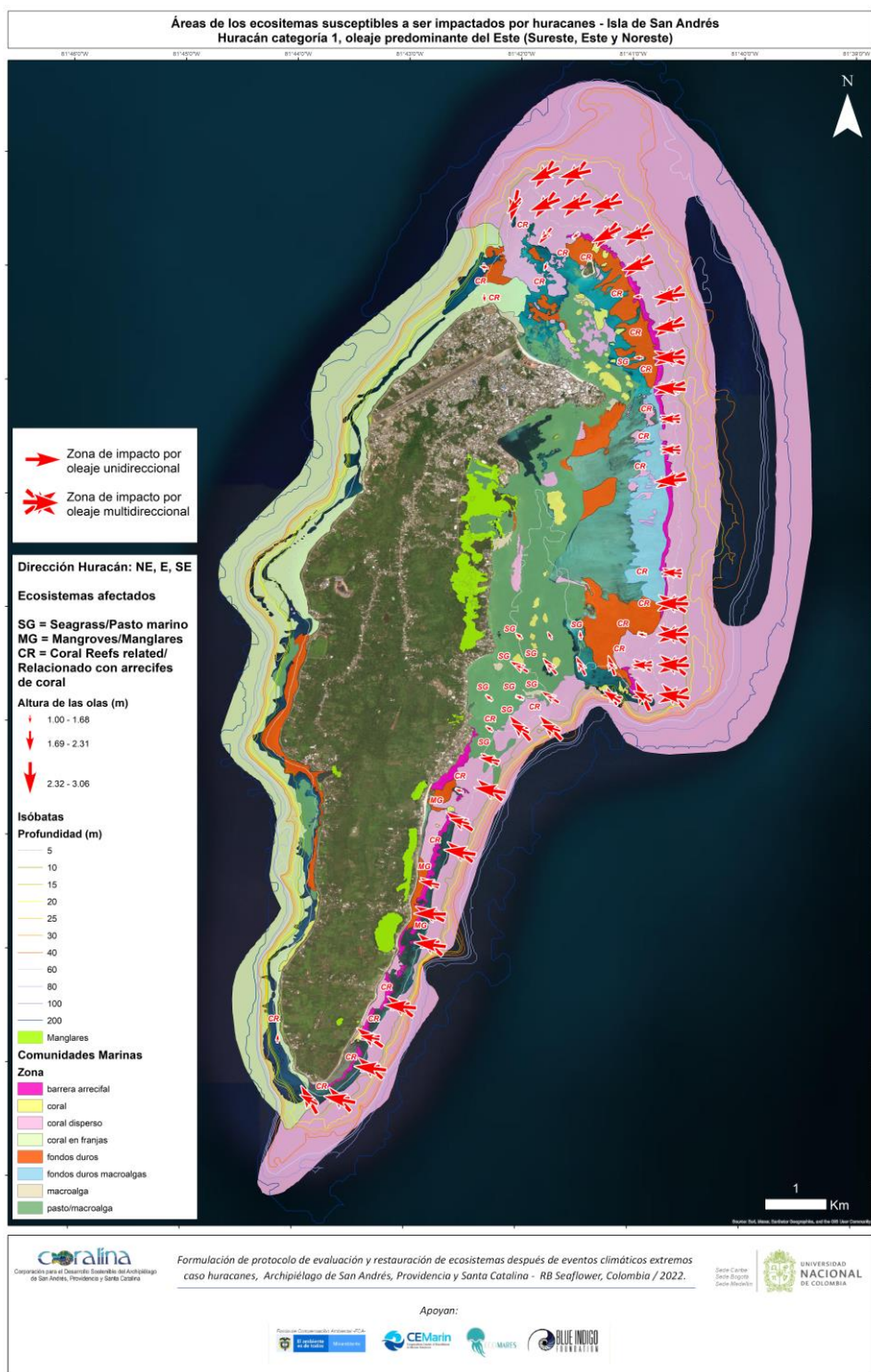


Figura 9. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.

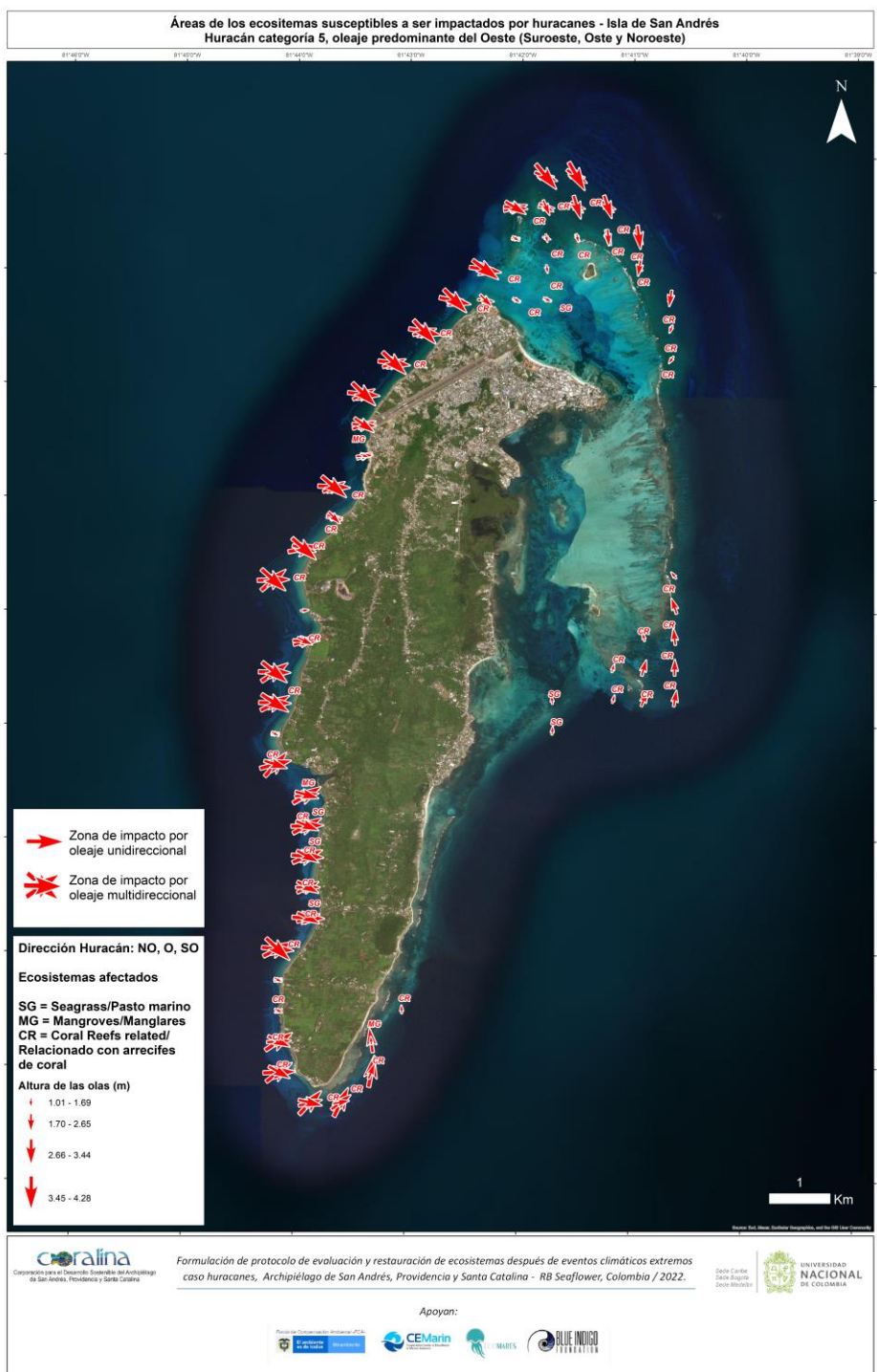


Figura 10. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.

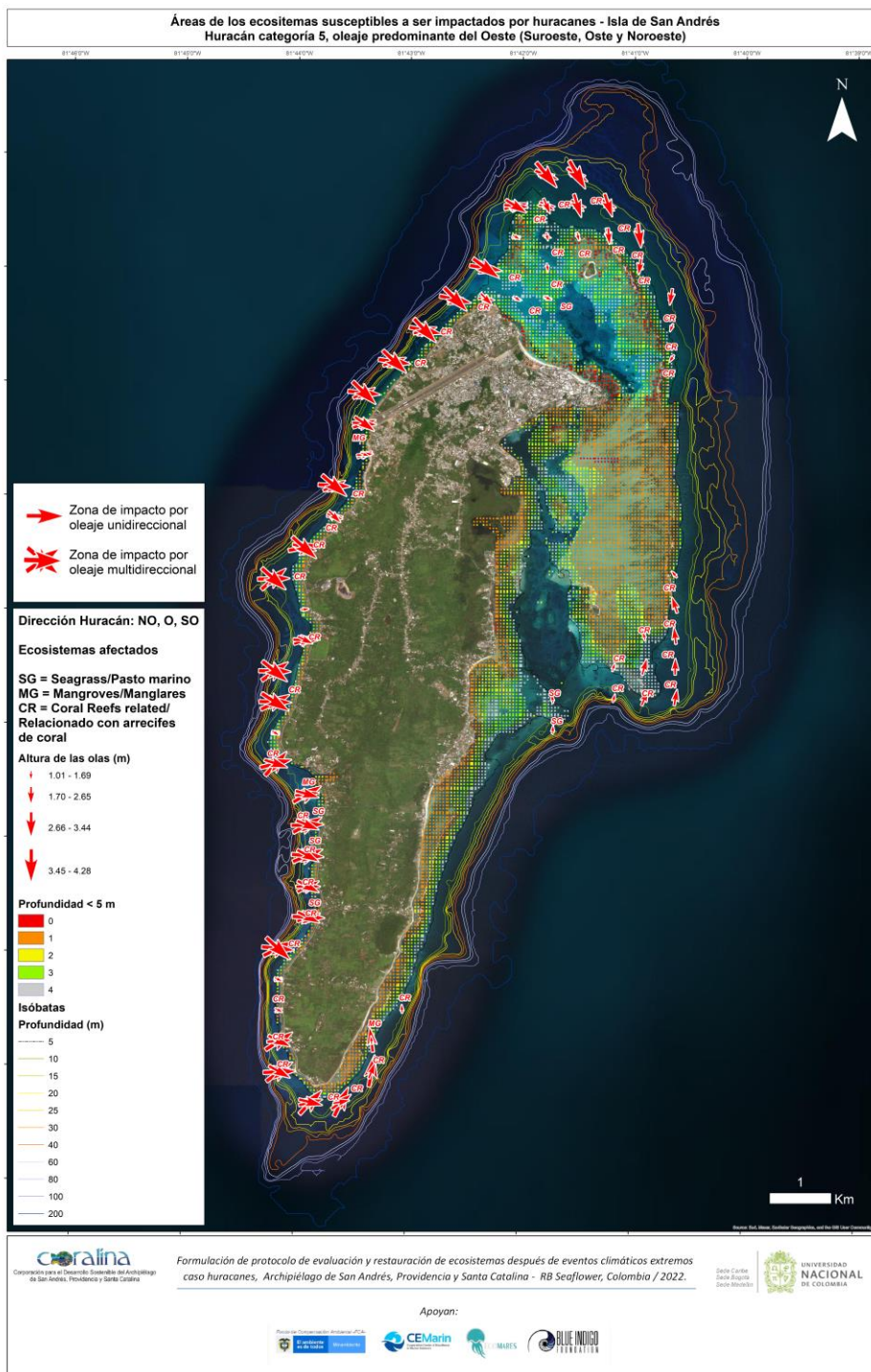


Figura 11. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital con batimetría.

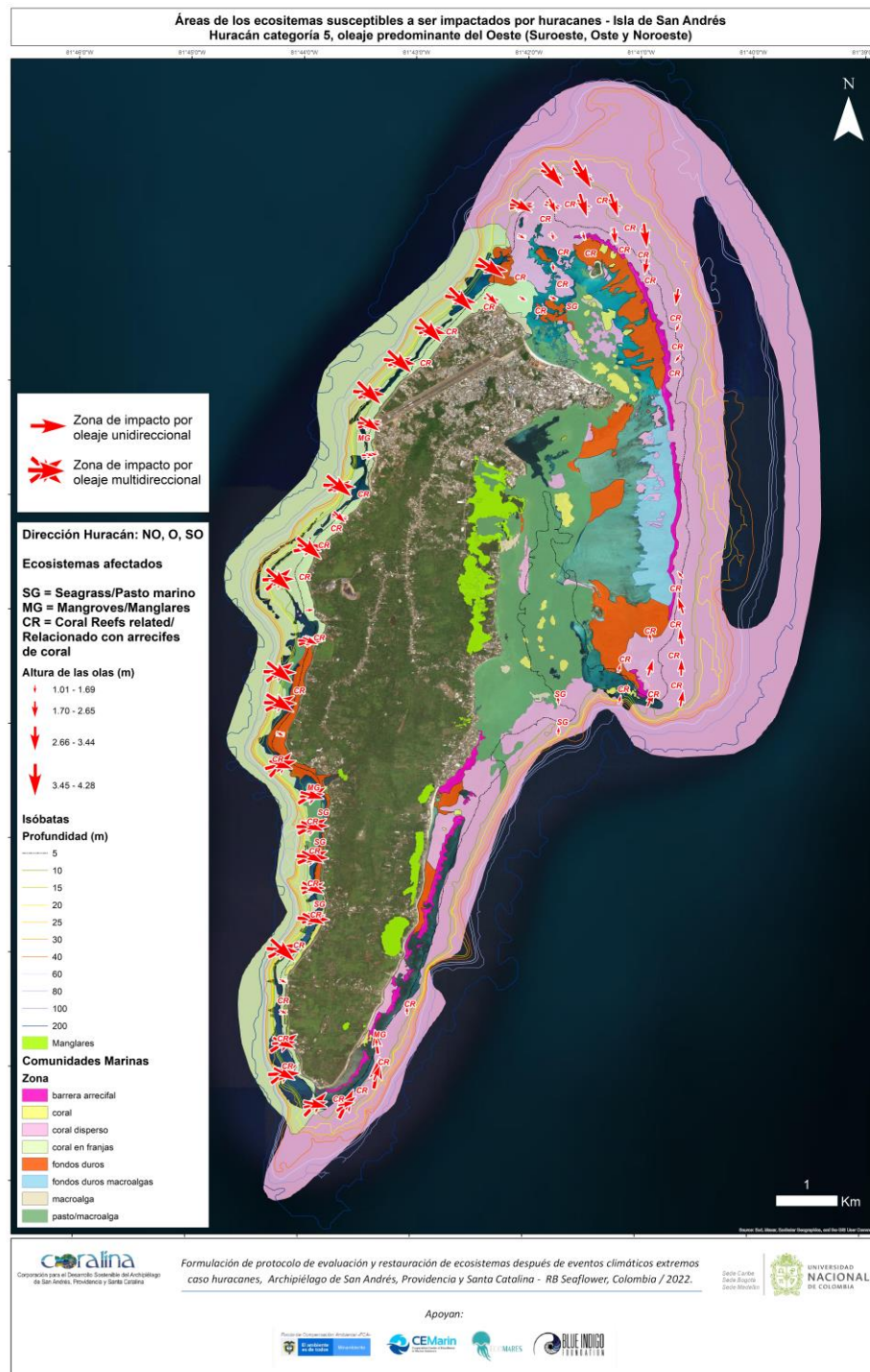


Figura 12. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.

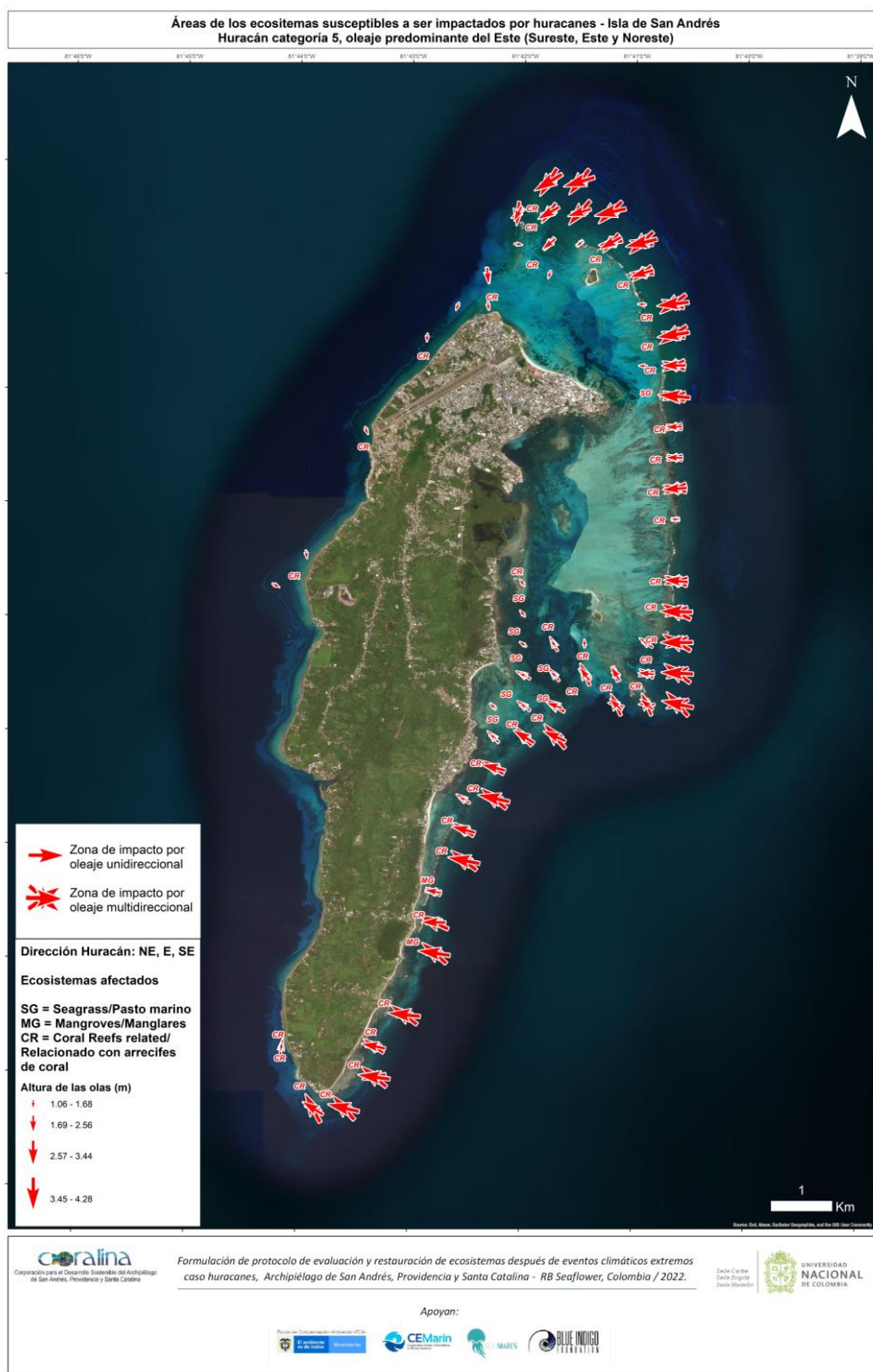


Figura 13. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.

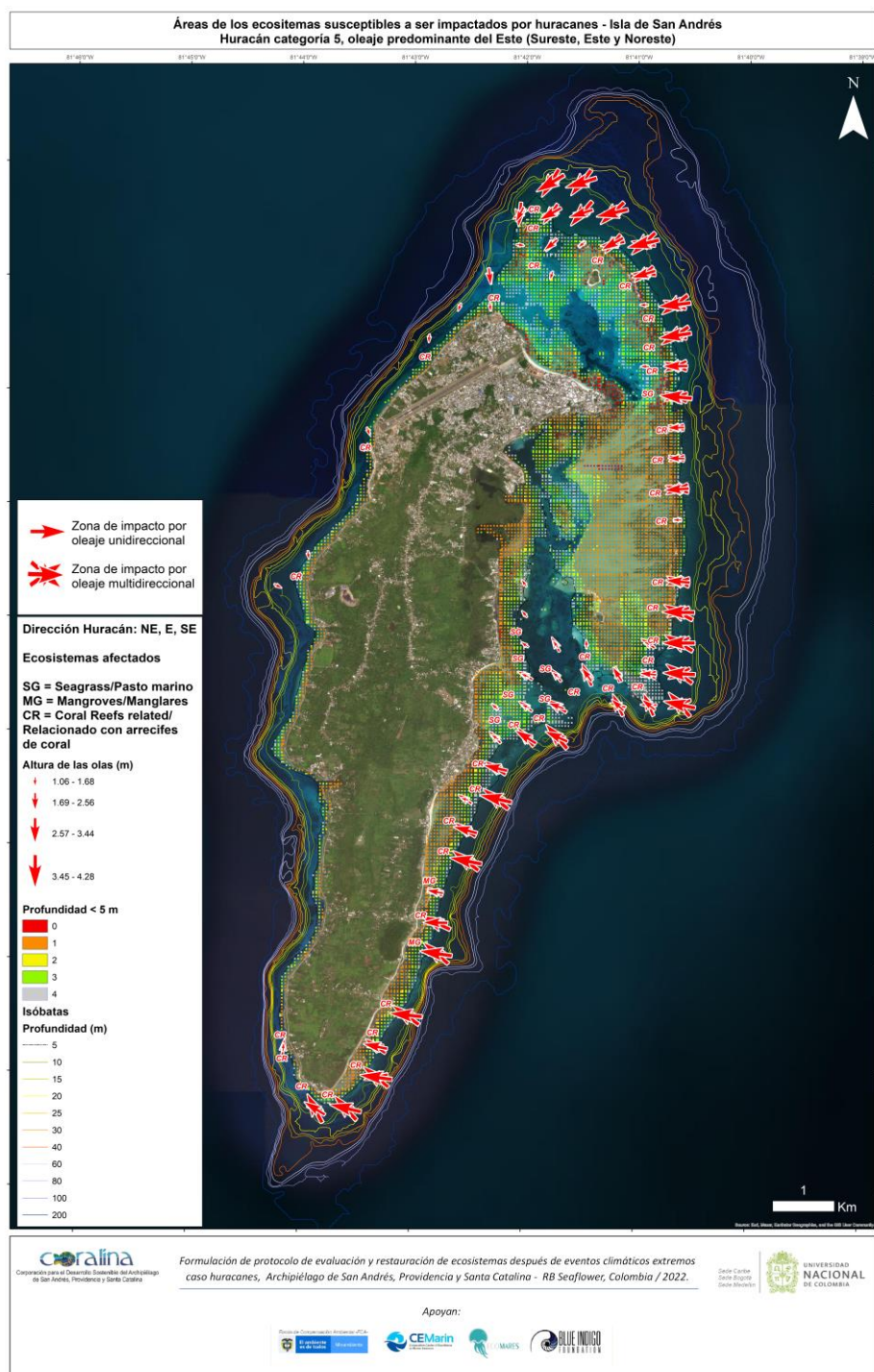


Figura 14. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría-

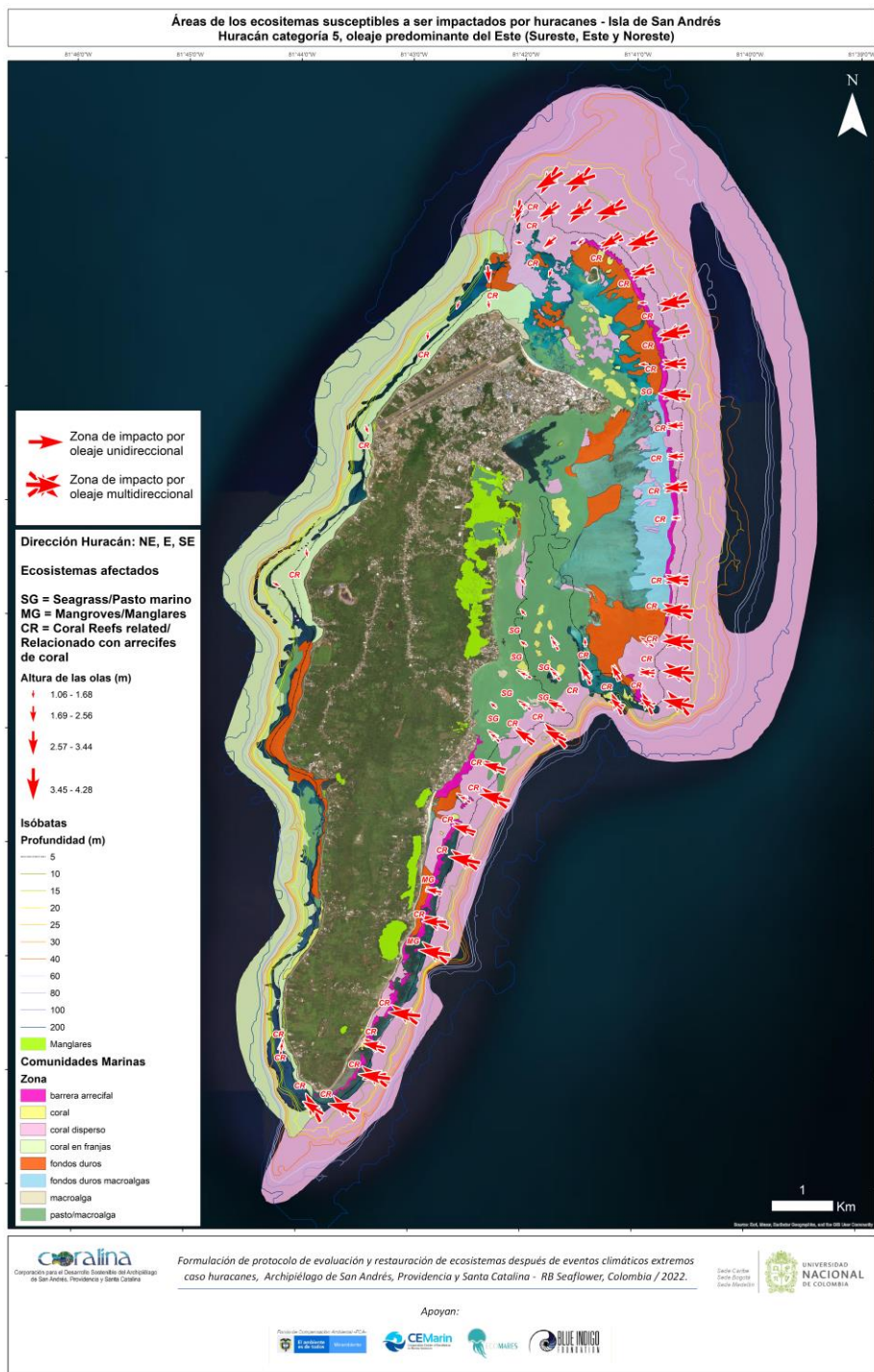


Figura 15. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en la isla de San Andrés, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas.

3. Mapas Providencia y Santa Catalina

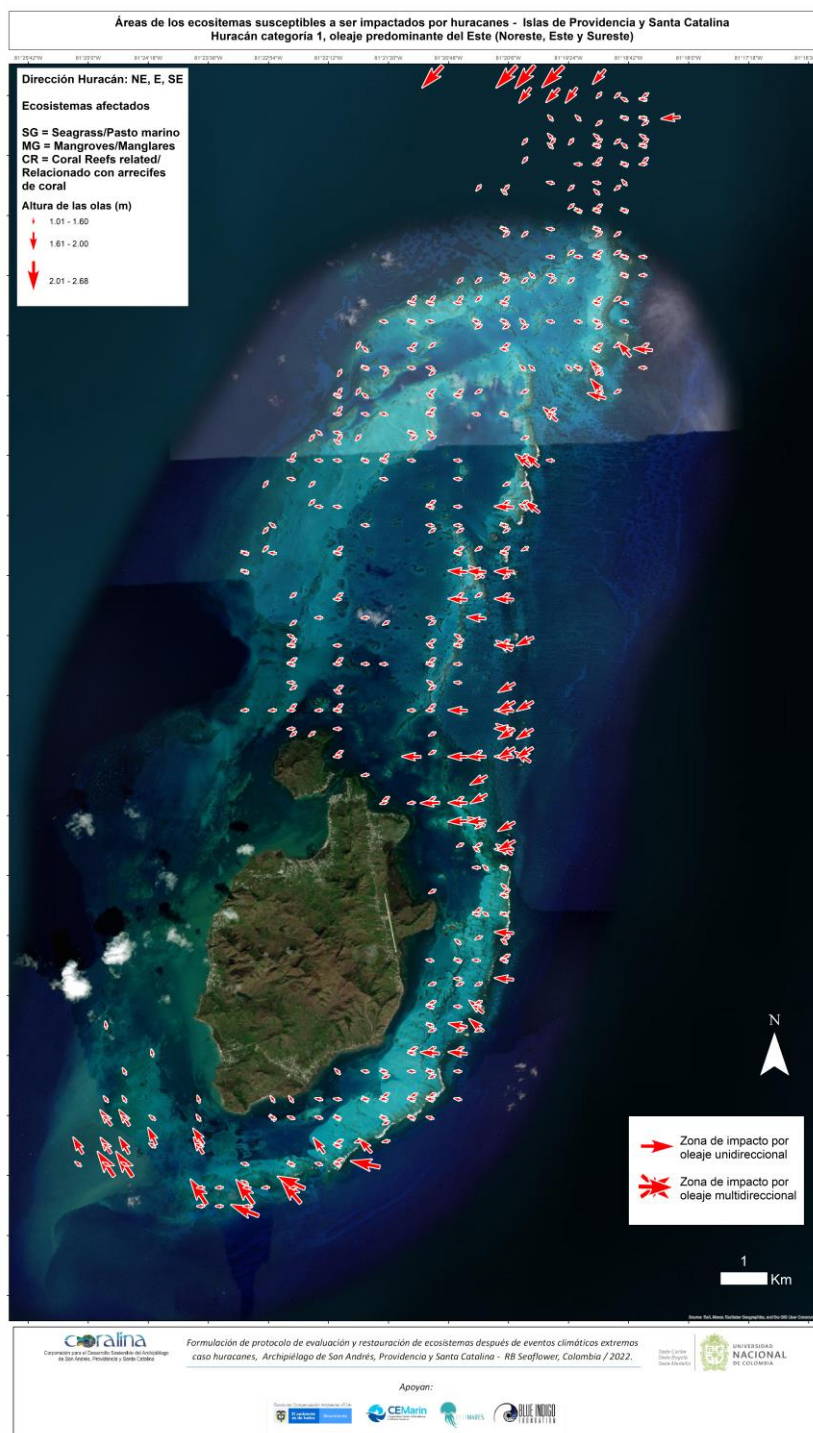


Figura 16. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a

huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.

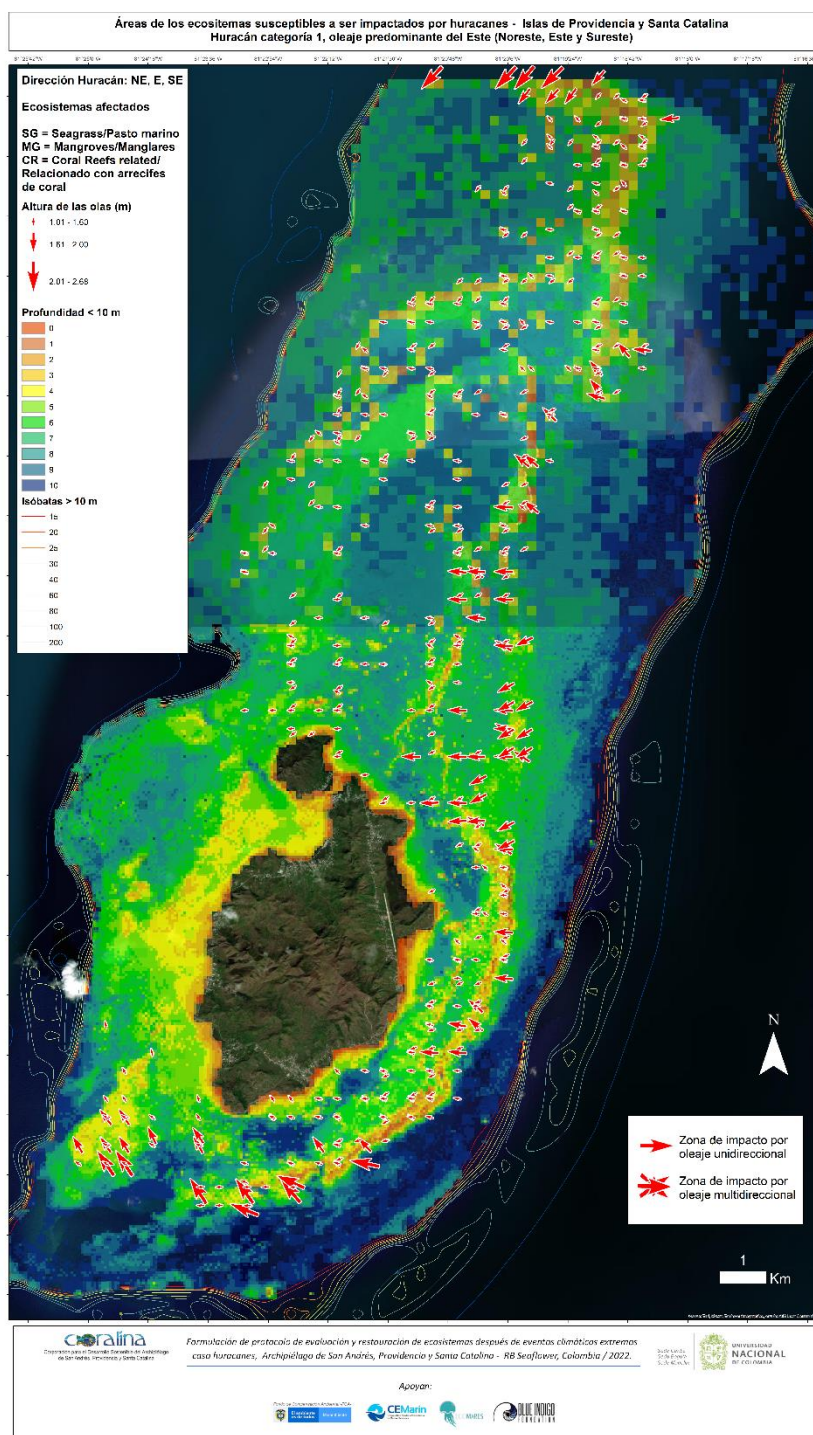


Figura 17. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría.

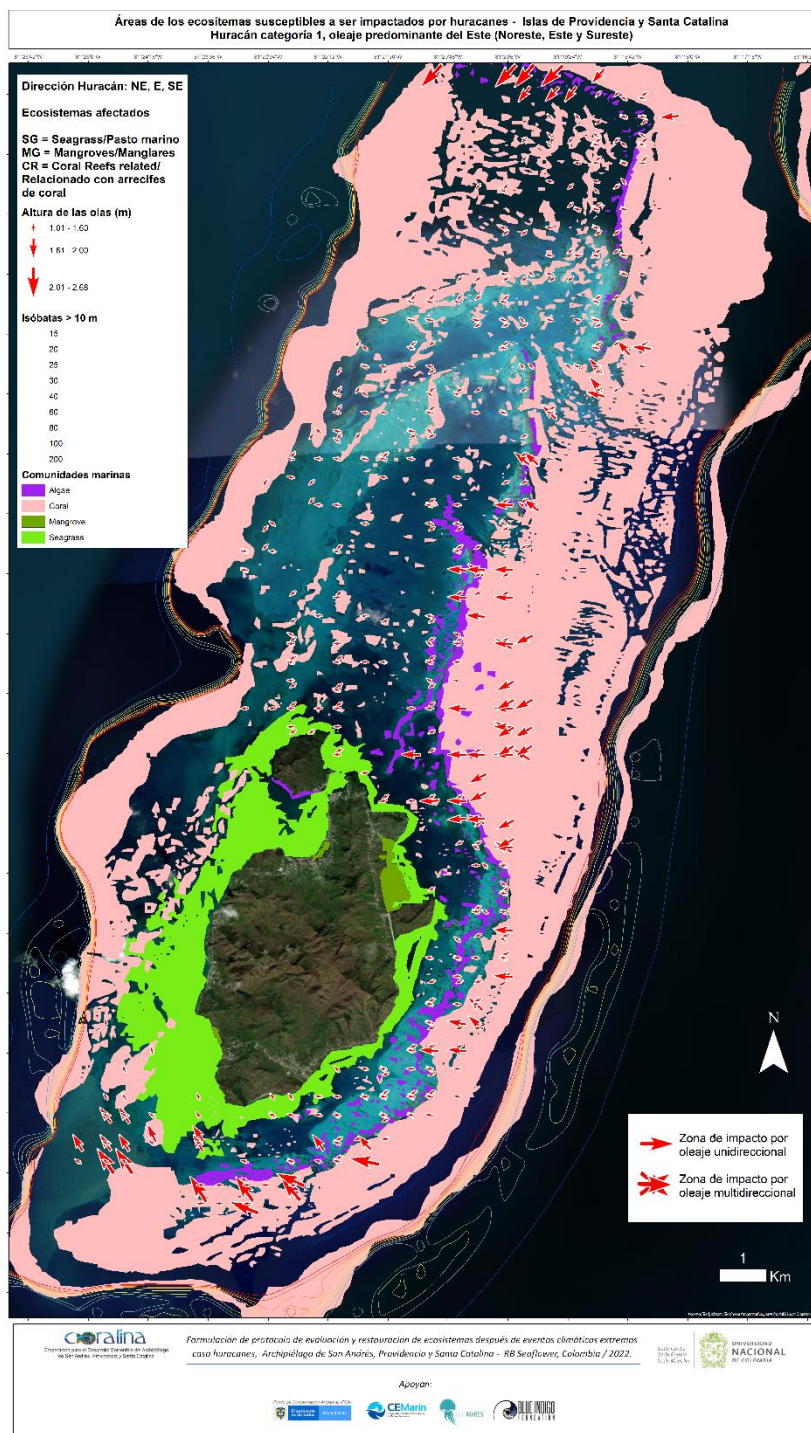


Figura 18. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.

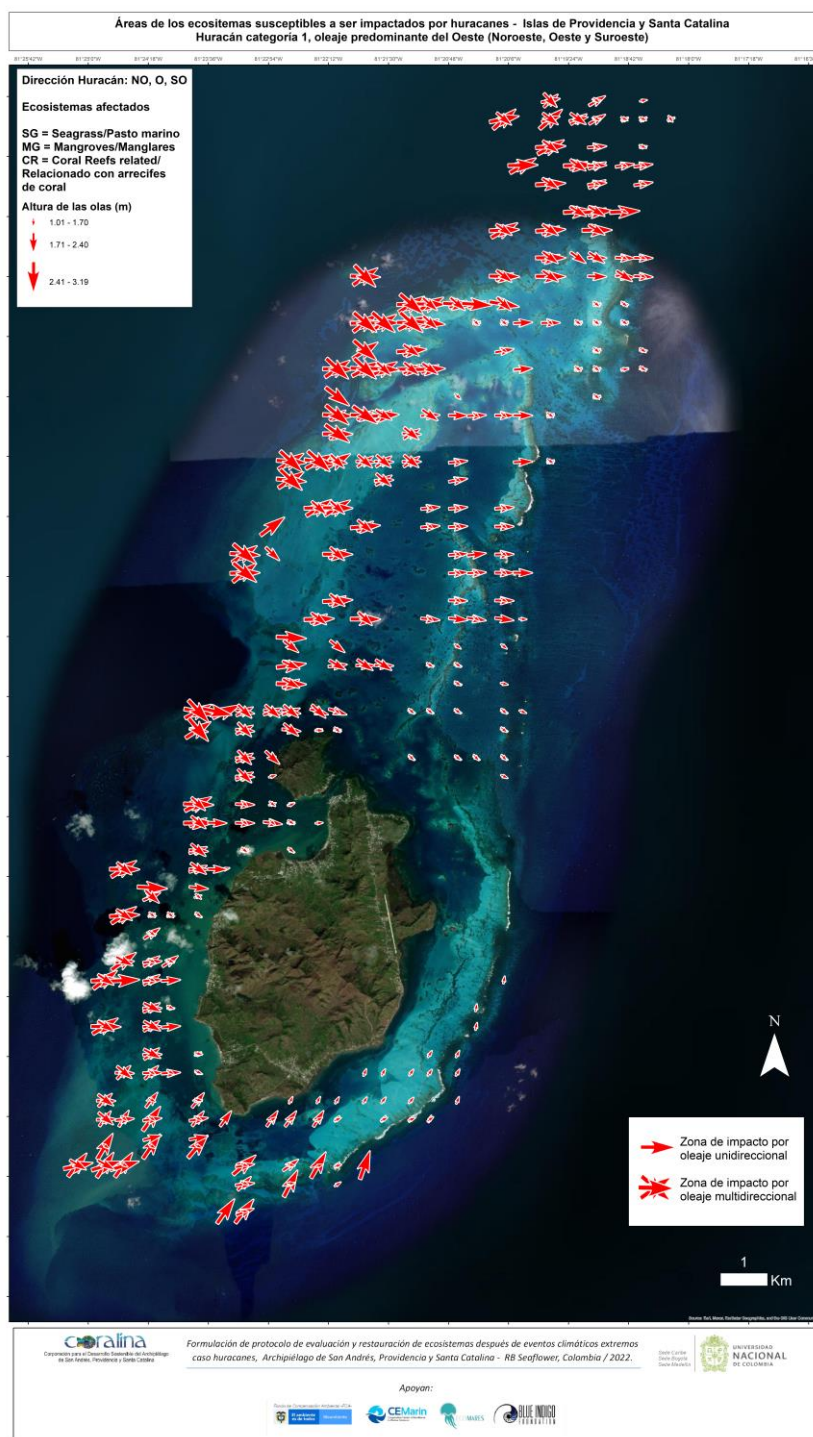


Figura 19. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.

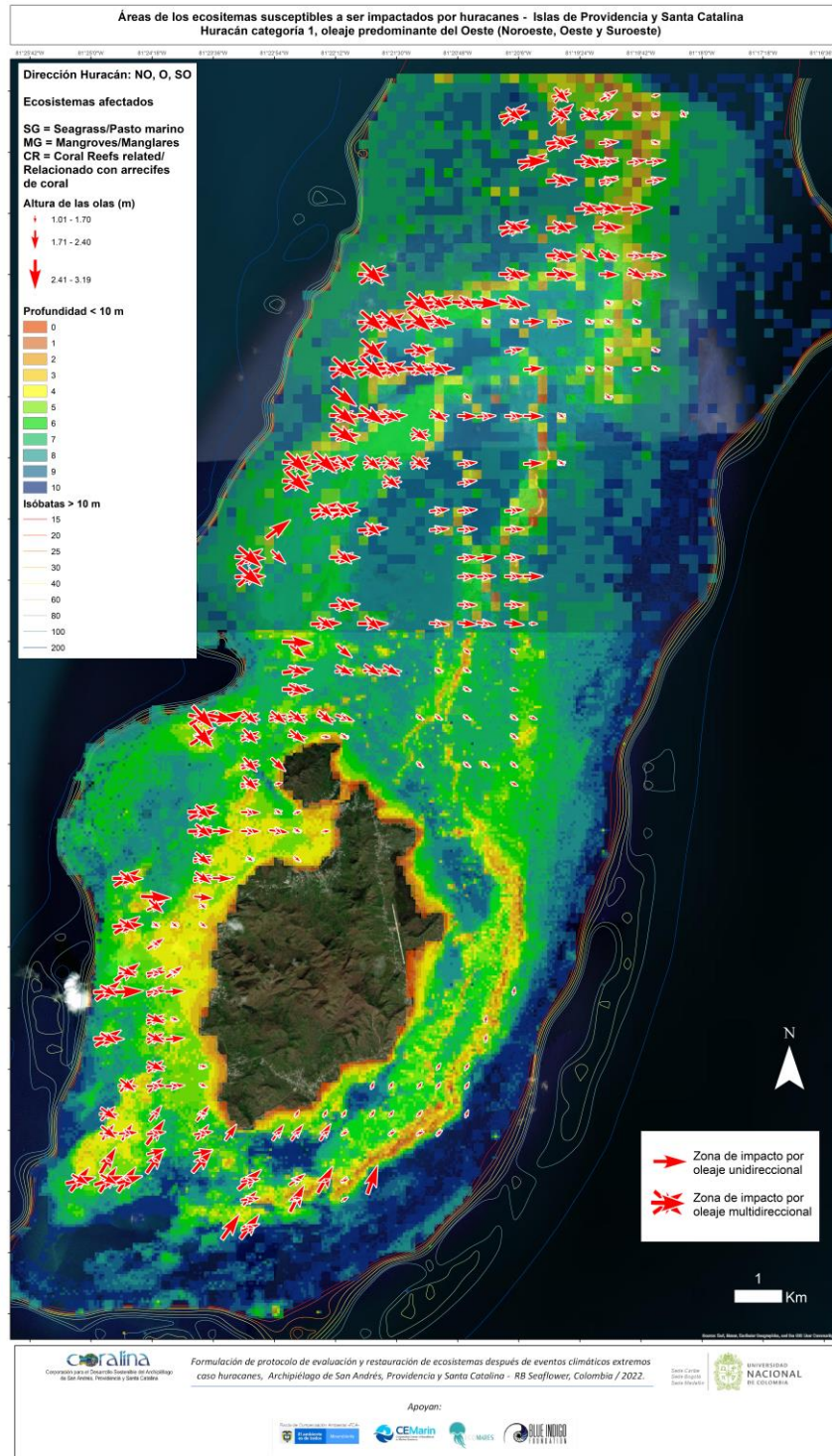


Figura 20. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital con batimetría.

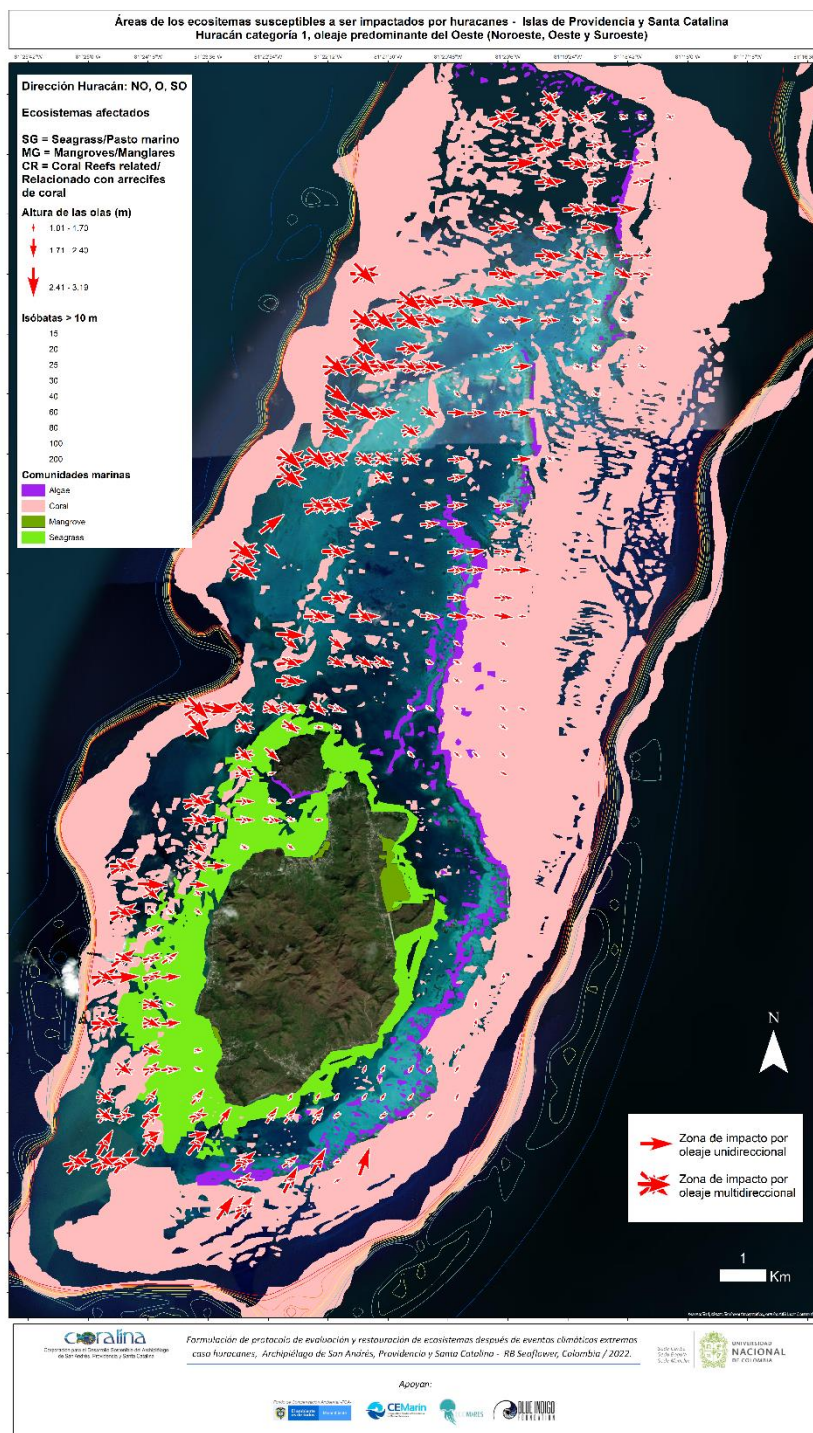


Figura 21. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 1 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas ecosistemas..

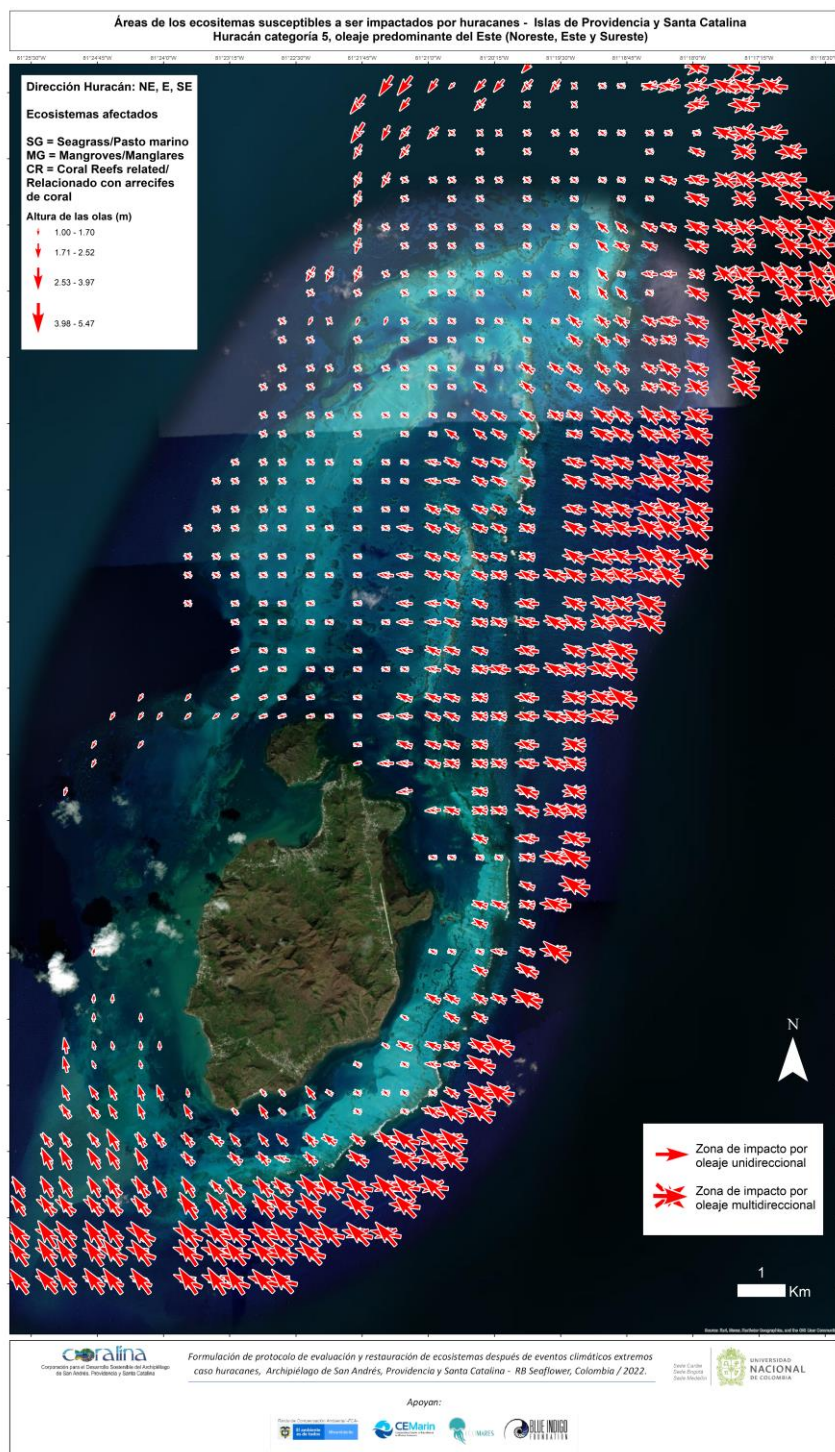


Figura 22. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital en color natural.

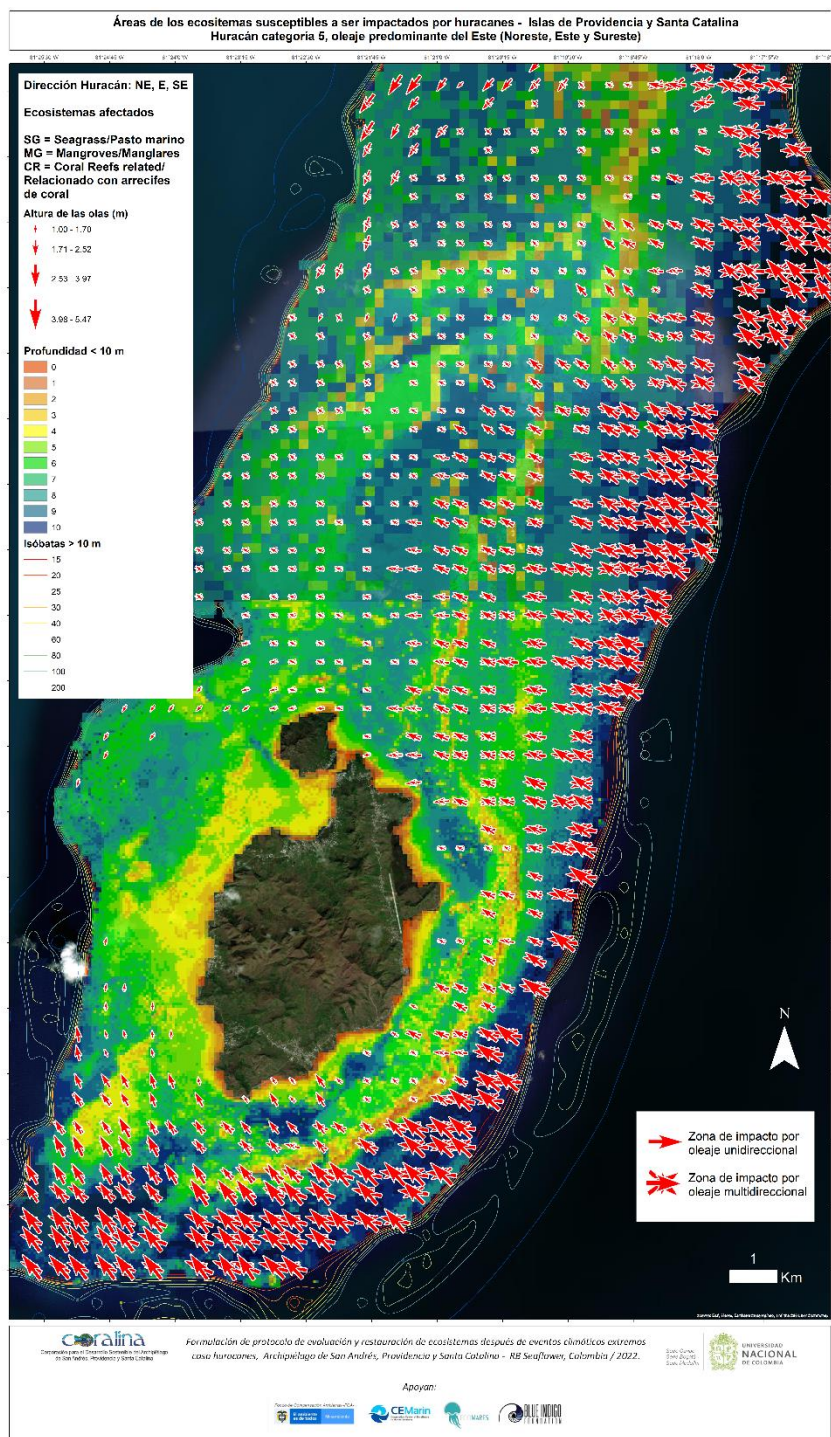


Figura 23. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen satelital con batimetría.

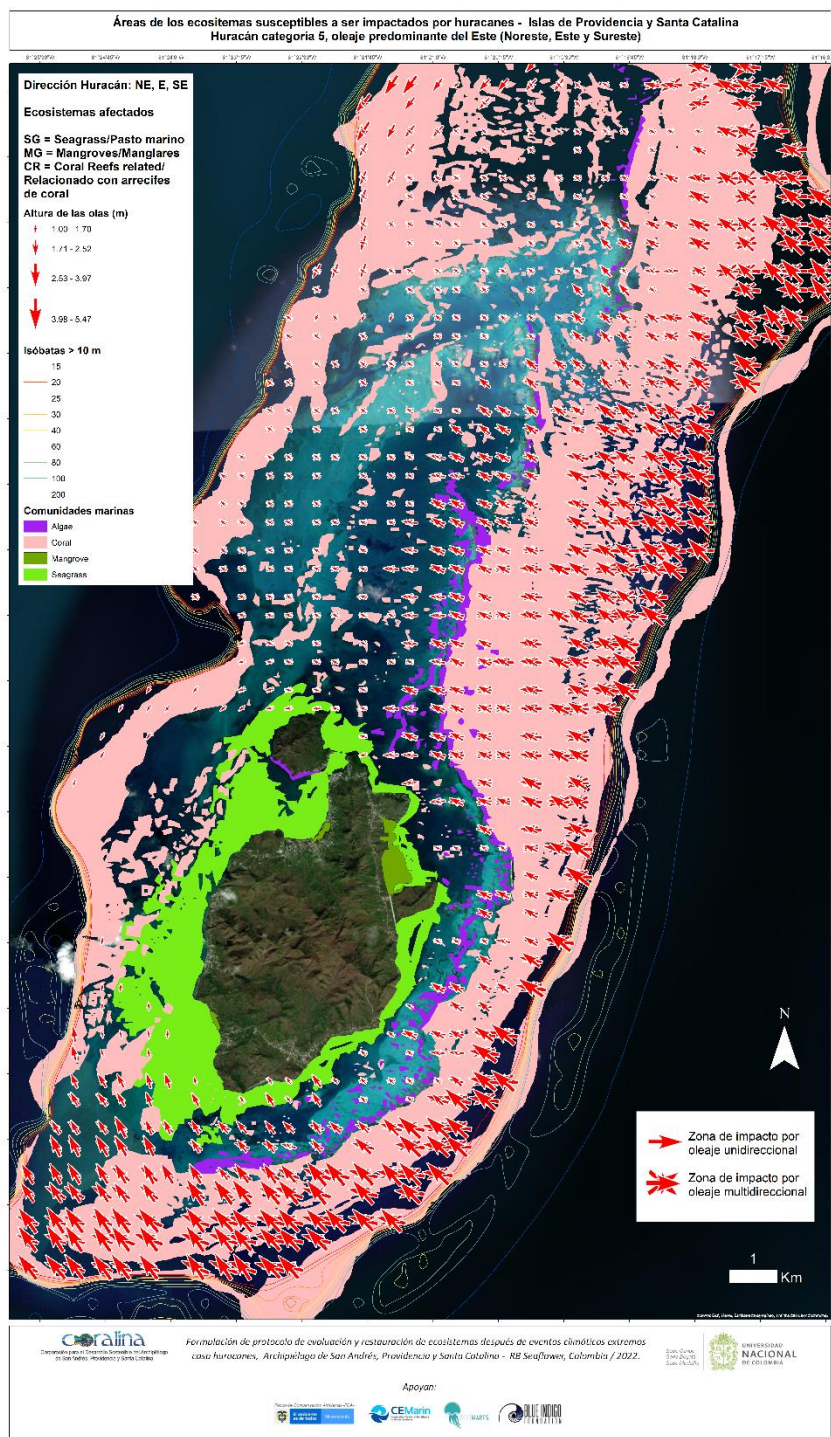


Figura 24. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Este (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Sur de la Isla). Imagen con capas de ecosistemas

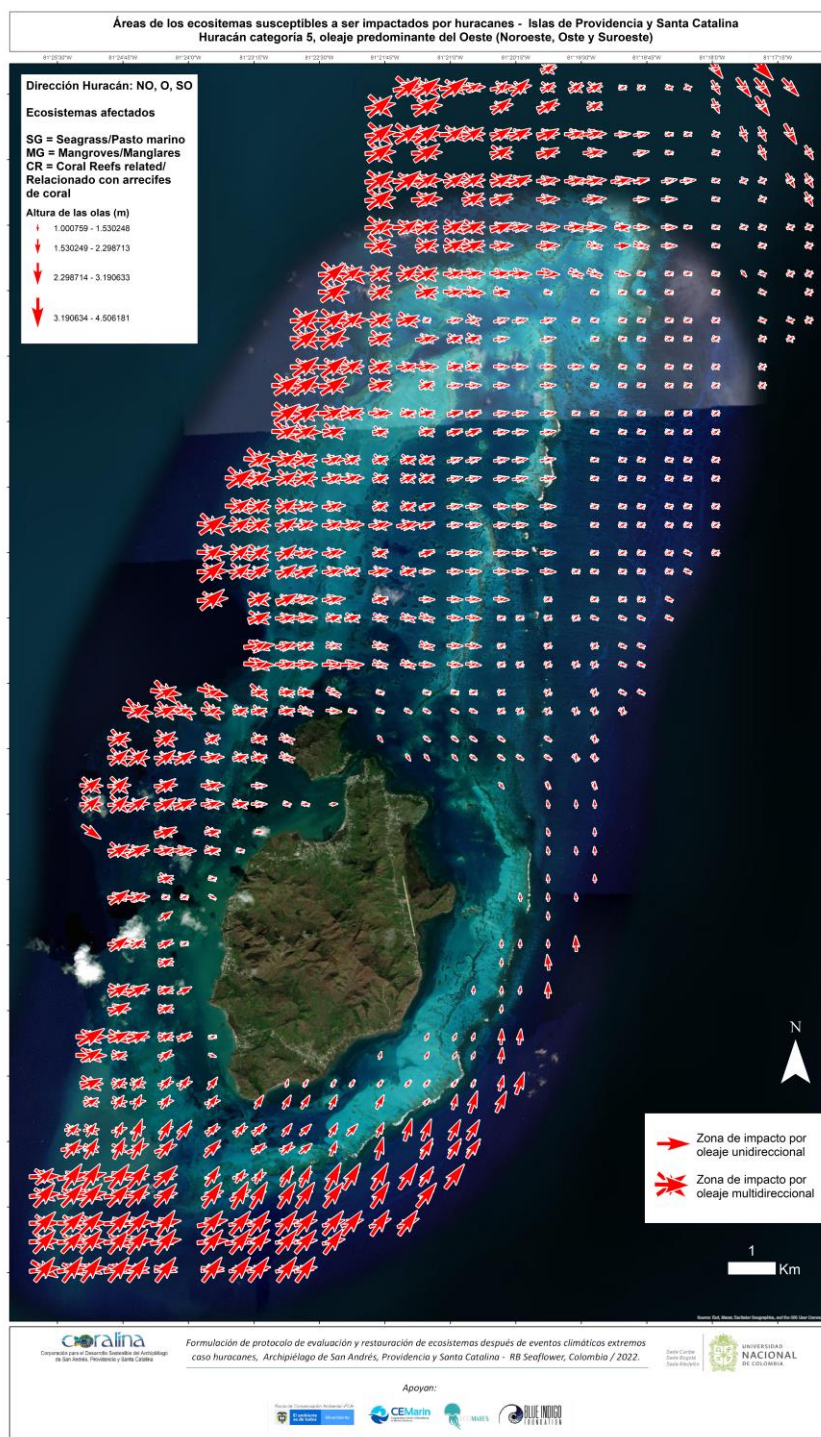


Figura 25. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital en color natural.

Protocolo de evaluación y restauración de ecosistemas después de eventos climáticos extremos caso huracanes: Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina - RB Seaflower, Colombia. Informe Final a CORALINA. Por UNAL Sede Caribe, Bogotá, Medellín. Asesoría UNAL, ECOMARES, BLUE INDIGO y CEMARIN, San Andrés - 2022

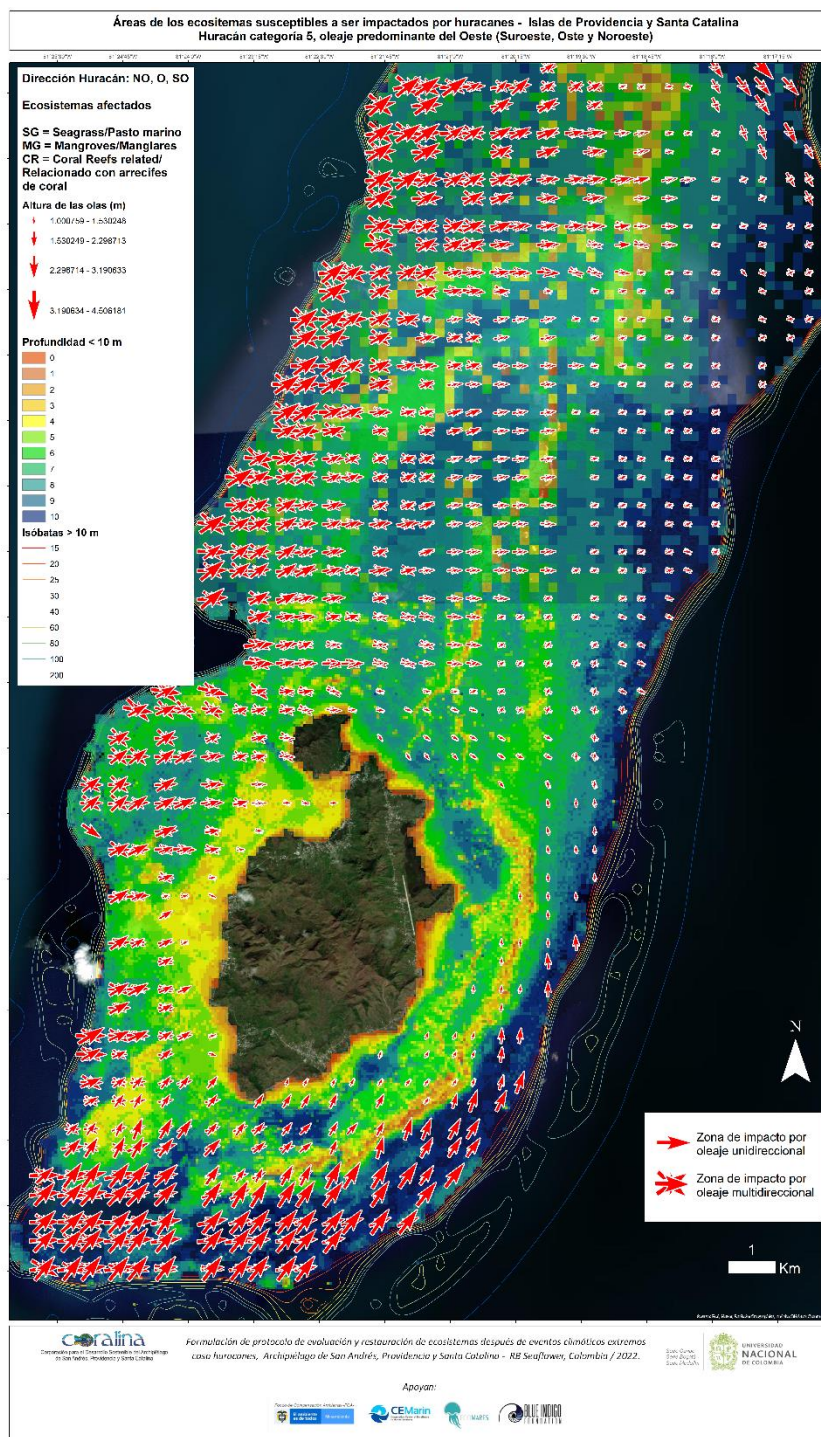


Figura 26. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen satelital con batimetría.

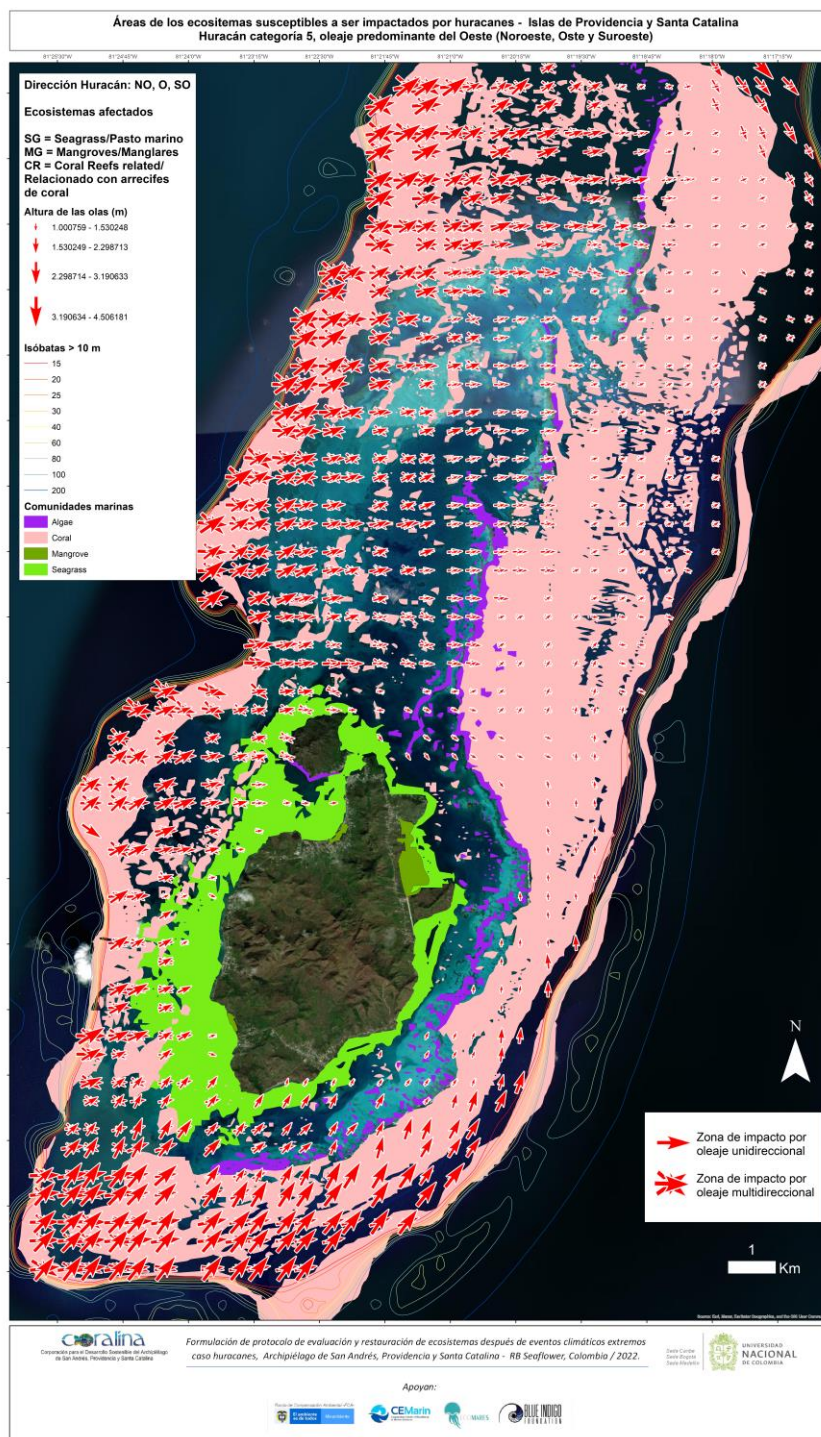


Figura 27. Mapa de áreas susceptibles a ser impactadas por huracanes categoría 5 en las islas de Providencia y Santa Catalina, con oleaje predominante desde el Oeste (asociado principalmente a huracanes con trayectoria del centro del ciclón pasando por el Norte de la Isla). Imagen con capas ecosistemas.

4. Referencias

- Coralina-Invemar. 2012. Gómez-López, DI, Segura-Quintero C, Sierra-Correa PC, Garay-Tinoco J. 2012. Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andréis" -INVEMAR- y Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina -CORALINA-. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 28. Santa Marta, Colombia 180 pp.
- Prato J., Santos-Martínez A., Castaño D., Cupul-Magaña A., Schuhmann P., Mancera-Pineda J.E. Robles A., Macariz A., Hudson A. & Medina J. (2020). Natural shields for Caribbean insular territories: Wave and wind attenuation by coral reef barriers and mangroves at San Andrés Island, Seaflower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean. GCFI 73th. Book of abstracts. Gulf and Caribbean Fisheries Institute. 72 p.
- Sierra J.P.; Lo Presti A. 1998. Estudio comparative de criterios de rotura del oleaje regular. Ingeniería del Agua. 5(1): 23-34.