

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE CAMBIO
CLIMÁTICO PARA EL PUERTO DE COMPAS CARTAGENA

ORIETA MARGARITA HAMBURGER CÁRDENAS

JACK ARLEEN RAMÍREZ MOLINA

UNIVERSIDAD EAN

FACULTADA DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN PROYECTOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

BOGOTÁ D.C. COLOMBIA

22-07-2024

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE CAMBIO
CLIMÁTICO PARA EL PUERTO DE COMPAS CARTAGENA

ORIETA MARGARITA HAMBURGER PADILLA

JACK ARLEEN RAMÍREZ MOLINA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magíster en Proyectos de Desarrollo Sostenible

Director:

ELIZABETH LEÓN VELÁSQUEZ, PhD

Modalidad:

Trabajo Dirigido

UNIVERSIDAD EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible

BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

22-07-2024

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial a nuestra tutora Elizabeth León Vásquez por sus valiosas recomendaciones, dedicación incansable y paciencia, elementos fundamentales que contribuyeron significativamente al desarrollo de este trabajo. Extendemos nuestro reconocimiento y agradecimiento a la Compañía de Puertos Asociados - Compas S.A., por brindarnos la oportunidad de realizar un proyecto que no solo aporte a la organización, sino que también esté alineado con su estrategia ambiental. Agradecemos a todo el personal de la Compañía que colaboró suministrando información crucial para el desarrollo de la investigación.

Expresamos nuestra gratitud a la Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (RedMpomm) de la Dirección General Marítima (DIMAR) y a su Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (Cecoldo), por su colaboración y el suministro de datos meteorológicos y oceanográficos esenciales para el éxito de este trabajo. A la Universidad EAN, agradecemos por compartir conocimiento y metodología que enriquecieron el enfoque de nuestra investigación.

Finalmente, queremos reconocer a todas las personas que, de diversas maneras, dedicaron su tiempo, conocimiento y esfuerzo para colaborar en la culminación exitosa de este proyecto. Su generosidad y apoyo han sido fundamentales en cada etapa de nuestra labor.

RESUMEN

En este estudio sobre la vulnerabilidad al cambio climático del puerto Compas en Cartagena, se llevó a cabo un análisis abordando amenazas climáticas como el aumento del nivel del mar, altas temperaturas, ráfagas de viento, descargas eléctricas y lluvias. La evaluación identificó riesgos significativos para las operaciones portuarias, la infraestructura, y la seguridad del personal. Como resultado, se propusieron medidas de adaptación que buscan aumentar la resiliencia y la capacidad adaptativa del sistema portuario Compas Cartagena.

El estudio no solo evalúa la vulnerabilidad del puerto, sino que también proporcionó un plan integral que fortalece la resiliencia portuaria y establece un estándar para la gestión efectiva de los riesgos climáticos en las operaciones portuarias, sirviendo como modelo para el sector.

Palabras clave: Puerto, cambio climático, riesgo, amenaza, vulnerabilidad climática, sostenibilidad, mitigación y adaptación al cambio climático.

ABSTRACT

In this climate change vulnerability study of the Compas port in Cartagena, an analysis was conducted addressing climate hazards such as sea level rise, high temperatures, wind gusts, electrical discharges, and rainfall. The assessment identified significant risks to port operations, infrastructure, and personnel safety. As a result, adaptation measures were proposed to increase the resilience and adaptive capacity of the Compas Cartagena port system.

The study not only delineated the vulnerability of the port, but also provided a comprehensive plan that strengthens port resilience and sets a standard for effective climate risk management in port operations, serving as a model for the sector.

Keywords: Port, climate change, risks, threats, climate vulnerability, sustainability, mitigation, and adaptation to climate change.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo general	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	JUSTIFICACIÓN	20
4	MARCO INSTITUCIONAL	22
4.1	Presentación general de la empresa	22
4.2	Espacio geográfico del área de estudio.....	24
4.3	Referentes estratégicos	26
4.4	Estructura organizacional.	28
4.5	Servicios y productos prestados por la empresa	31
4.6	Infraestructura del puerto Compas Cartagena.	32
4.7	Análisis del sector portuario.	34
5	MARCO DE REFERENCIA	36
5.1	El clima, el cambio climático y sus implicaciones en la zona portuaria de Cartagena.....	37
5.2	El cambio climático global	39
5.3	Análisis de la vulnerabilidad ante el cambio climático	41
5.3.1	Componentes de la evaluación de la vulnerabilidad.....	42
5.3.2	La reducción de la vulnerabilidad y adaptación ante el cambio climático.....	47
5.3.3	Medidas de adaptación con el cambio climático en los puertos	48
6	DISEÑO METODOLÓGICO	53
6.1	Tipo de investigación.....	54
6.2	Análisis externo	55
6.3	Análisis interno.....	55

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

6.3.1	Población, muestra y ficha técnica.....	56
6.3.2	Identificación de las variables de la encuesta	58
6.3.3	Instrumento de análisis interno	59
6.3.4	Validación del instrumento de medición	60
6.4	Diseño de la investigación.....	61
6.4.1	Adquisición de información de campo.	62
6.4.2	Análisis de variables meteorológicas y mareográficas.	62
6.4.3	Evaluación de la vulnerabilidad.....	63
7	RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD.....	67
7.1	Análisis Variables Externas.....	67
7.1.1	Análisis estadístico de variables meteorológicas	67
7.1.2	Análisis estadístico de variables mareográficas.....	101
7.2	Análisis interno.....	110
7.2.1	Amenazas climáticas.....	110
7.2.2	Exposición	115
7.2.3	Sensibilidad.....	117
7.2.4	Medidas de adaptación.....	123
7.2.5	Gestión Interna del Cambio Climático.....	124
7.2.6	Aplicación de Matriz DOFA.....	126
7.2.7	Estimación de emisiones GEI actuales y futuras del puerto	127
7.3	Evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático	129
7.3.1	Amenazas.....	129

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

7.3.2	Exposición	137
7.3.3	Sensibilidad.....	139
7.3.4	Impacto potencial.....	140
7.3.5	Índice de Riesgo Climático Empresarial IRCE.....	142
7.3.6	Capacidad adaptativa	150
7.3.7	Evaluación de vulnerabilidad al cambio climático	155
7.3.1	Medidas de adaptación.....	161
8	PLAN DE INTERVENCIÓN	165
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
9.1	Conclusiones.....	169
9.2	Recomendaciones	171
10	REFERENCIAS.....	174
ANEXO 1		188

Lista de Tablas

Tabla 1.....	32
Tabla 2.....	44
Tabla 3.....	48
Tabla 4.....	51
Tabla 5.....	57
Tabla 6.....	64
Tabla 7.....	65
Tabla 8.....	71
Tabla 9.....	74
Tabla 10.....	75
Tabla 11.....	77
Tabla 12.....	78
Tabla 13.....	79
Tabla 14.....	81
Tabla 15.....	83
Tabla 16.....	84
Tabla 17.....	85
Tabla 18.....	87

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 19.....	89
Tabla 20.....	90
Tabla 21.....	92
Tabla 22.....	94
Tabla 23.....	96
Tabla 24.....	97
Tabla 25.....	98
Tabla 26.....	100
Tabla 27.....	100
Tabla 28.....	104
Tabla 29.....	106
Tabla 30.....	107
Tabla 31.....	108
Tabla 32.....	109
Tabla 33.....	111
Tabla 34.....	114
Tabla 35.....	118
Tabla 36.....	126
Tabla 37.....	130
Tabla 38.....	132

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 39.....	135
Tabla 40.....	138
Tabla 41.....	138
Tabla 42.....	138
Tabla 43.....	139
Tabla 44.....	139
Tabla 45.....	140
Tabla 46.....	144
Tabla 47.....	151
Tabla 48.....	152
Tabla 49.....	152
Tabla 50.....	154
Tabla 51.....	156
Tabla 52.....	161
Tabla 53.....	165

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.	23
Figura 2.	23
Figura 3.	25
Figura 4.	26
Figura 5.	28
Figura 6.	29
Figura 7.	31
Figura 8.	33
Figura 9.	43
Figura 10.	68
Figura 11.	70
Figura 12.	72
Figura 13.	76
Figura 14.	79
Figura 15.	80
Figura 16.	82
Figura 17.	83
Figura 18.	92
Figura 19.	93

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 20.	94
Figura 21.	96
Figura 22.	103
Figura 23.	104
Figura 24.	105
Figura 25.	106
Figura 26.	108
Figura 27.	111
Figura 28.	113
Figura 29.	114
Figura 30.	115
Figura 31.	117
Figura 32.	118
Figura 33.	119
Figura 34.	124
Figura 35.	128
Figura 36.	136
Figura 37.	137
Figura 37.	148
Figura 38.	148

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 39	158
Figura 40.	160

1 INTRODUCCIÓN

Hay un consenso científico que sostiene que la Tierra está experimentando cambios globales en su clima, evidenciados por alteraciones en los patrones de precipitación, aumento del nivel del mar, variaciones en las temperaturas, extensión de los periodos lluviosos y de sequía, la incidencia de fenómenos climáticos como ciclones y tormentas. Sin embargo, existe incertidumbre respecto a las magnitudes y tasas de variación con las que se producen estos cambios y, por tanto, repercuten en la infraestructura y las condiciones de diseño original.

Por esta razón, los análisis de vulnerabilidad y riesgo se consideran un paso crucial para establecer los cimientos necesarios para desarrollar un plan de adaptación frente a las transformaciones climáticas (Rangel Buitrago, 2013). El cambio climático se define como la alteración predominante a largo plazo (decenios, siglos, milenios, entre otros) de las variables climáticas, con significativos impactos probables en la economía, condiciones ambientales y en las comunidades que se benefician o afectan.

En contraste, la variabilidad climática se refiere a cambios por encima o por debajo de las condiciones normales o promedios en las variables climatológicas a una menor escala temporal, la cual puede ser interpretada con el análisis de registros y análisis estadísticos de las variables meteorológicas (IDEAM - UNAL, 2018).

La creciente inquietud ante los impactos del cambio y variabilidad climática mundial y por consiguiente regional, ha generado la necesidad imperante de evaluar y comprender los las amenazas derivadas asociadas a estos cambios, especialmente en sectores críticos de la economía de un territorio y su infraestructura de transporte, donde los puertos marítimos se

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

destacan como nodos de conexión comercial internacional. En este contexto, el presente proyecto se concentra en analizar e identificar las amenazas derivadas de las condiciones climáticas presentes y previstas con el propósito de evaluar las condiciones de vulnerabilidad del sistema portuario del Puerto de la Compañía de Puertos Asociados S.A.S. (Compas S.A.S.) en Cartagena de Indias.

Dada su ubicación en la bahía, la infraestructura y operaciones del puerto están inherentemente vinculadas al entorno marítimo y climático, haciéndolo susceptible a los impactos adversos del cambio climático. En este contexto, el presente proyecto busca dar respuesta a la pregunta ¿Cuál es el grado de vulnerabilidad frente al cambio climático del puerto Compas —Cartagena; y las posibles medidas de adaptación que requiere para mantener un funcionamiento eficiente?

El proceso metodológico seguido en esta investigación aborda desde la definición de conceptos climáticos, hasta la propuesta de medidas específicas de adaptación para el Puerto Compas en Cartagena.

En una primera etapa, se llevó a cabo el reconocimiento de la zona de estudio, comprendiendo la geografía y las características ambientales que rodean al Puerto Compas Cartagena. Esta fase permitió contextualizar el análisis y entender las particularidades del entorno en el que opera el puerto.

Para fundamentar el análisis, se llevaron a cabo estudios de variables climáticas clave como temperatura, precipitación y nivel del mar. Los datos se obtuvieron de la base de datos de la Estación sinóptica principal del IDEAM localizada en el Aeropuerto Rafal Núñez y la Estación mareográfica de la Isla Manzanillo, suministrados por el Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (CECOLDO) de la Dirección General Marítima (Dimar) para el

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

periodo de 2003 a 2020, se analizaron para describir el comportamiento de las variables climáticas en el área de estudio.

La investigación incorpora un análisis de la percepción de los funcionarios del puerto mediante una encuesta, identificando las preocupaciones y percepciones subjetivas sobre la vulnerabilidad del puerto ante aspectos climáticos. La información obtenida complementa los datos objetivos y cuantitativos, proporcionando una visión más completa de la situación.

Se lleva a cabo la implementación de la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para el análisis de la vulnerabilidad consignado en el Plan de gestión del cambio climático para puertos marítimos de Colombia donde se establecen herramientas para evaluar el riesgo climático empresarial y la vulnerabilidad climática empresarial.

Según los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad, se formulan medidas de adaptación de acuerdo con la escala de riesgos para priorización y escala de vulnerabilidad para la necesidad de aumento de la resiliencia y capacidad adaptativa del sistema portuario de Compas en Cartagena.

Estas medidas no solo abordan los riesgos identificados, sino que también se alinean con el objetivo de fortalecer el sistema en su conjunto y los pilares de sostenibilidad del puerto. Además, se presenta un plan de intervención integral que establece plazos, presupuestos e indicadores, proporcionando una hoja de ruta clara para la implementación de las medidas propuestas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad del puerto Compas Cartagena frente al cambio climático y proponer medidas de adaptación que fortalezcan la resiliencia de ante este fenómeno.

2.2 Objetivos específicos

Identificar y evaluar las principales amenazas climáticas que afectan al puerto Compas Cartagena, considerando su ubicación geográfica y su vulnerabilidad ante el cambio climático.

Hacer un diagnóstico del puerto Compas Cartagena, evaluando su vulnerabilidad frente a las amenazas del cambio climático.

Sugerir un conjunto de medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad del puerto ante el cambio climático y minimizar sus impactos negativos en las operaciones portuarias.

Presentar un plan de implementación de las medidas de adaptación propuestas, que incluye cronograma, estimación de costos y plazos de ejecución.

3 JUSTIFICACIÓN

La base del proyecto de investigación sobre el análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación al cambio climático en Compas - Cartagena radica en la necesidad apremiante de abordar las complejidades relacionadas al cambio climático. Este estudio se sitúa en un contexto mundial en el que los impactos del cambio climático representan una amenaza tangible y en constante aumento. Según el IPCC, uno de los efectos más destacados es el aumento del nivel del mar, con proyecciones científicas que indican un posible incremento entre 0,3 y 2,4 metros para el año 2100. (IPCC, 2021). Este escenario se complementa junto a otras amenazas climáticas como altas mareas, ciclones, marejadas ciclónicas, erosión y subsidencia, aumenta de manera considerable el peligro de inundaciones, impactando no solo en las áreas costeras y su economía, sino también en la operatividad de los puertos (Margarita Pery & editor, 2021).

Estudios sobre la vulnerabilidad de los puertos ante el cambio climático señalan que, tras evaluar los principales puertos globales respecto a su exposición a eventos climáticos, se encontró que el 55 % del comercio mundial pasa por puertos con un elevado riesgo climático. Asimismo, se determinó que aproximadamente el 8 % de este comercio es susceptible a tres o más riesgos climáticos (The Economist, 2020). En este sentido, adaptar este tipo de estudios a la realidad colombiana es fundamental para proteger la economía, considerando que el sector portuario movilizó alrededor de 167 millones de toneladas en 2022. De esta cifra, 144 millones de toneladas se desplazaron en el Caribe colombiano, y el puerto de Cartagena representó el 24,8 % del tráfico portuario nacional (Supertransporte, 2023).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Compas, en su calidad de primer puerto multipropósito del país y consciente de la problemática, ha formulado estrategias corporativas con el propósito de alcanzar un crecimiento planificado, una operación segura y sostenible en términos operativos y financieros. Entre estas estrategias, se destaca la orientación de la mitigación y cambio climático, la cual se enfoca en identificar los riesgos y proponer soluciones a las vulnerabilidades asociadas a este fenómeno. Asimismo, se centra en capitalizar las oportunidades derivadas del cambio climático mediante el impulso de iniciativas para la adaptación y mitigación, con el fin de fortalecer la resiliencia de Compas en el corto, medio y largo plazo (Compas, 2021).

Al ser los puertos las principales entradas y salidas de insumos, los impactos causados por eventos climáticos desencadenarían consecuencias más allá de la operación del puerto, interrumpiendo las cadenas de suministro y causando escasez e incremento de los precios. Por tanto, analizar la vulnerabilidad e implementar medidas de adaptación en este sector representa un aspecto crítico para garantizar la competitividad del país en un escenario de cambio climático.

Esta investigación permitió evaluar la vulnerabilidad del puerto Compas – Cartagena. Con base a los hallazgos, se sugirió un plan de intervención con medidas de adaptación que conduzcan al puerto a ser resiliente con el cambio climático alineándose a los compromisos de la agenda 2030 con respecto a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible —ODS, como lo establece su Política de Sostenibilidad Empresarial. De implementar el plan, la empresa tendría la oportunidad de posicionarse dentro de los mercados verdes, obteniendo múltiples beneficios, reduciendo su vulnerabilidad e incrementando su competitividad en un mercado cambiante y que apunta hacia el desarrollo sostenible.

4 MARCO INSTITUCIONAL

4.1 Presentación general de la empresa

La Compañía de Puertos Asociados S.A. Compas, es la única red de puertos multipropósito en Colombia del sector portuario y logístico, constituida en 2012, se fundó con el nombre de Muelles el Bosque, en la actualidad opera cinco (5) terminales en Colombia. Compas Barranquilla, Compas Tolú, Compas Cartagena, Compas Cascajal y Compas Aguadulce en Buenaventura, así como Compas Houston, además de una sede administrativa en Bogotá. Figura 1 y Figura 2

Compas se encarga de servicios logísticos de cargue, descargue y almacenamiento de bienes exportados como maquinaria, herramientas y autopartes, insumos de la construcción e industria del carbón. Así, como la importación de alimentos, hidrocarburos y energéticos, insumos de la construcción y fertilizantes. Presta también servicios de intermediación comercial entre navieras y operadores de transporte, servicio conocido como Bróker de fletamento. (COMPAS, 2023).

La compañía cuenta con cinco accionistas, dos de ellos mayoritarios: el fondo de inversiones West Street Infraestructura Partners (WSIP) Port Holdings II Ltd y la sociedad Southern Ports Holdings S. de R. L. de la familia Echavarría Obregón y el Grupo Ership de España. Los accionistas mayoritarios tienen una participación accionaria del 50%. (Compas, 2021).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

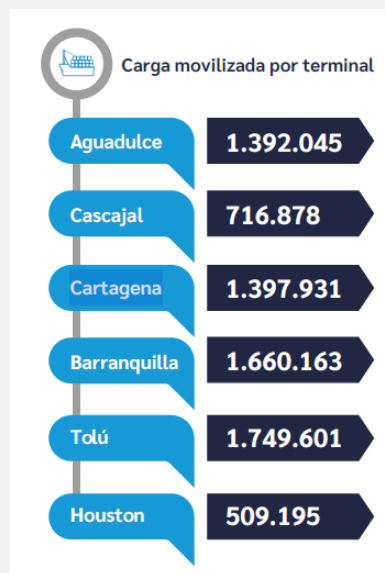
Figura 1.

Localización de las terminales Compas en Colombia.



Figura 2.

Carga movilizada por la red de terminales Compas para 2022.



Nota: Toneladas movilizadas. Figura tomada del Informe de Gestión Compas 2022.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Compas cuenta con una fuerza de trabajo de 362 trabajadores, de los cuales 333 son directos y 29 trabajadores externos, sus ingresos operacionales son de 391.314 millones de pesos y 1,239 billones de pesos en activos para el año 2022. De acuerdo con las cifras de valor y crecimiento, para el año 2022, Compas tuvo un crecimiento del 6,8 % en cargas movilizadas respecto al año anterior. (COMPAS, 2023).

Corporativamente, la junta directiva delega en Andrés Orlando Osorio Barrera como presidente y del Comité Ejecutivo la responsabilidad del plan y ejecución de los proyectos de acuerdo con los objetivos corporativos enmarcados en la estrategia de sostenibilidad.

El puerto Compas Cartagena, está ubicado en la Bahía de Cartagena de Indias (Bolívar) barrio El Bosque, cuenta con una capacidad de operación de 3 millones de toneladas, se movilizan carga general, de proyectos, a granel y contenedores en un área de 22 ha. El área portuaria de la Bahía de Cartagena se muestra en la Figura 3.

Para 2022 se movilizaron 1'397.931 t La carga movilizada corresponde a contenedores con un 50 %, granel comestible con un 16 %, carga general con un 19 % y granel no comestible 15 %. (COMPAS, 2023).

4.2 Espacio geográfico del área de estudio

La terminal de Compas Cartagena está localizada en la costa del Mar Caribe colombiano, al norte de la Bahía de Cartagena en la denominada Bahía interna de Cartagena, área en el interior de la ciudad, separada del oleaje del mar abierto por Bocagrande y rodeada por la Isla de Manga, el Centro Histórico, el barrio El Bosque, la Isla de Manzanillo y Castillogrande.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Este cuerpo de agua tiene una extensión aproximada de 8 km², una profundidad promedio de 20 m, el canal natural de unos 880 m entre Castillogrande y la Isla de Manzanillo permite la entrada de las embarcaciones desde la Bahía de Cartagena. Figura 3.

Figura 3.

Localización del área portuaria en la Bahía de Cartagena.



Fuente. Elaboración propia

La infraestructura de Compas Cartagena se encuentra localizada en el área continental del barrio el Bosque y la Isla Diablo, unidas por una vía en terraplén de unos 40 m. Figura 4.

Las aguas que permiten la entrada de embarcaciones a la Bahía interna de Cartagena están influenciadas por las corrientes de la Bahía de Cartagena, la hidrodinámica de los flujos circulantes entrantes y salientes está determinada por el empuje superficial del viento, los niveles de marea y los aportes de aguas y sedimentos del Río Magdalena a través del Canal del Dique. En la temporada de lluvias el Canal del Dique tiene gran influencia sobre las corrientes

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

superficiales y aporte de sedimentos, en época de estiaje las aguas del Dique generan una corriente en el fondo de Sur a Norte. (Centro ambiental de Cartagena de Indias, 2019).

Figura 4.

Localización del Puerto Compas Cartagena



Fuente. Elaboración propia a partir de Bing

4.3 Referentes estratégicos

Según el informe de gestión 2022, Compas tiene como objetivo proporcionar empleo de calidad y buenas prácticas laborales a través de programas centrados en el desarrollo personal y profesional, la seguridad y salud en el trabajo, el fortalecimiento del liderazgo, la mejora del entorno laboral y la creación de relaciones laborales justas. La organización está comprometida con la gestión del talento humano y el bienestar de los trabajadores.

(COMPAS, 2023).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La organización gestiona su impacto medioambiental de forma responsable. Tienen programas para conservar los ecosistemas, reducir el consumo de recursos naturales como el agua, controlar su huella de carbono mediante la eficiencia energética, gestionar los residuos sólidos y medir las emisiones contaminantes. Están comprometidos con la sostenibilidad y la mitigación de los riesgos medioambientales en sus operaciones portuarias. (COMPAS, 2023)

Para ser más eficientes, supervisan y mejoran continuamente sus prácticas de gestión portuaria, actualizan los equipos, forman al personal, analizan y optimizan los procesos y reducen los tiempos de operación. Esto mejora la fiabilidad de sus servicios y crea valor para las partes interesadas. (COMPAS, 2023).

La organización garantiza prácticas empresariales éticas y transparentes con los mecanismos de una sólida estructura de gobierno corporativo, integridad en la gestión de riesgos, prevención de la corrupción y gestión oportuna de las amenazas susceptibles de afectar a la reputación y la sostenibilidad de la empresa. Estableciendo no solo la confianza, sino también la procesos y las relaciones con sus interesados. (COMPAS, 2023).

La empresa quiere tener un impacto positivo en las comunidades donde opera. Lo promueve la comunicación con los residentes locales, facilitando el acceso a una educación de calidad, incentiva la conservación del agua y ejecutando proyectos para mejorar los ingresos y el empleo. Su objetivo es promover el desarrollo, la inclusión y el bienestar de estas comunidades. (COMPAS, 2023)

La empresa se posiciona como aliado logístico de sus clientes mediante procesos de mejora continua e innovación que mejoran las operaciones portuarias. También garantiza una comunicación oportuna y constante para abordar las preocupaciones, y mantiene altos niveles de seguridad e integridad en la manipulación de la carga. (COMPAS, 2023).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Los resultados estratégicos se resumen en la Figura 5.

Figura 5

Resultados de gestión estratégica 2022.



Fuente. Elaboración propia.

El direccionamiento estratégico de la organización está orientado por su misión y visión corporativas. Según la misión de Compas, buscan “Generar valor al comercio exterior con soluciones logísticas integrales, eficientes, innovadoras y sostenibles a través de nuestra red de puertos multipropósito” (COMPAS, 2023).

Además, su visión consiste en “Consolidar a Compas para el año 2025, como la primera red portuaria y logística colombiana con presencia en América; duplicando el volumen de carga manejado en el 2020 y asegurando altos estándares de servicio, sostenibilidad y eficiencia” (COMPAS, 2023).

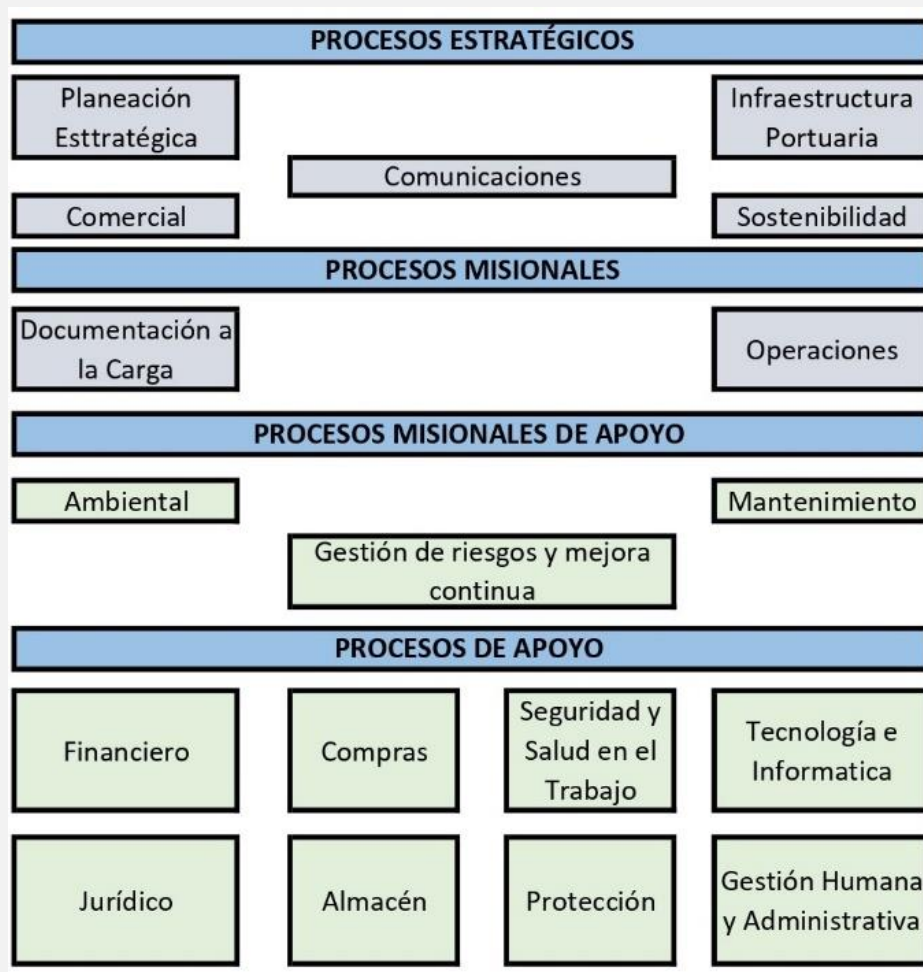
4.4 Estructura organizacional.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Compas desarrolla su actividad económica en varias instalaciones portuarias y para su operación y funcionamiento, ha diseñado una estructura corporativa para la prestación de los servicios, por eso a continuación se muestran los cuatro principales procesos en la Figura 6.

Figura 6.

Mapa de procesos Compas.



Fuente. Elaboración Propia. Documento interno, Mapa de procesos Compas 2022.

En los Procesos estratégicos Compas lleva a cabo la planeación estratégica, se definen objetivos y metas asociados a esta estrategia, en los cuales los gerentes de cada instalación portuaria juegan un papel fundamental.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

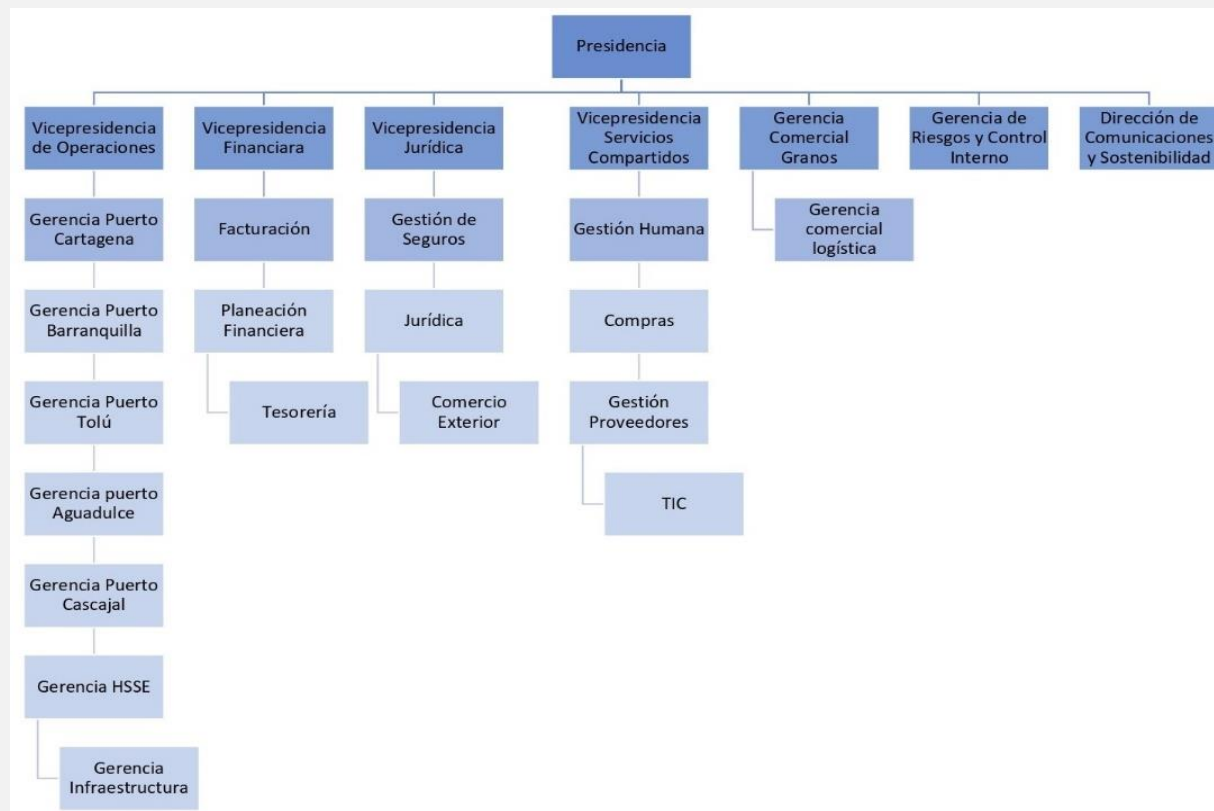
En los procesos misionales se integran las actividades relevantes de la razón de ser del negocio, es decir, la operación de la carga y su documentación.

Los Procesos misionales de apoyo consisten en asegurar el correcto desarrollo de las operaciones centrales. Esto implica la supervisión de la funcionalidad de maquinaria y equipos esenciales, así como la gestión y seguimiento al cumplimiento de requisitos legales como licencias, permisos y planes de manejo ambiental.

Los procesos de apoyo facilitan el funcionamiento de toda la estructura y aunque no hacen parte del proceso misional, son esenciales para llevar a cabo las actividades de prestación de servicios portuarios en las terminales. La Figura 7 muestra el diagrama organizacional de Compas.

Figura 7.

Diagrama organizacional Compas



Fuente. Elaboración propia basada en Compas, 2023.

4.5 Servicios y productos prestados por la empresa

Los servicios prestados por Compas permitieron movilizar para el año 2022 un total de 1.397.931 t de carga en operaciones de contenedores transportados, bajo procesos y estándares de productividad.

Compas aporta soluciones a los retos logísticos de un puerto marítimo. Se asegura de satisfacer las necesidades de sus clientes mediante diversos servicios. La Tabla 1 resume la ficha técnica del Puerto Compas Cartagena. (COMPAS, 2023).

- Carga y descarga de embarcaciones que transportan carga en contenedores,

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

alimentos a granel e industriales, carga de proyectos, carga sobredimensionada, carga animal y refrigerada.

- Recepción y despacho de carga en importación y exportación, administración de inventarios y entrega de cargas.
- Almacenamiento de carga general.
- Inspecciones a la carga seca y refrigerada.
- Carga en llenado y vaciado de contenedores de cargas secas o refrigeradas.

Tabla 1.

Ficha técnica puerto Compas Cartagena.

Ítem	Descripción
Área total del terminal	220.000 m ²
Línea de atraque	660 m
Posiciones de muelle	4
Calado operacional	12 m
Tipo de carga	General, contenedores y granel.
Ancho de la plataforma	30 m
Área de carga y proyectos	72.000 m ²
Área de bodega	15.524 m ²

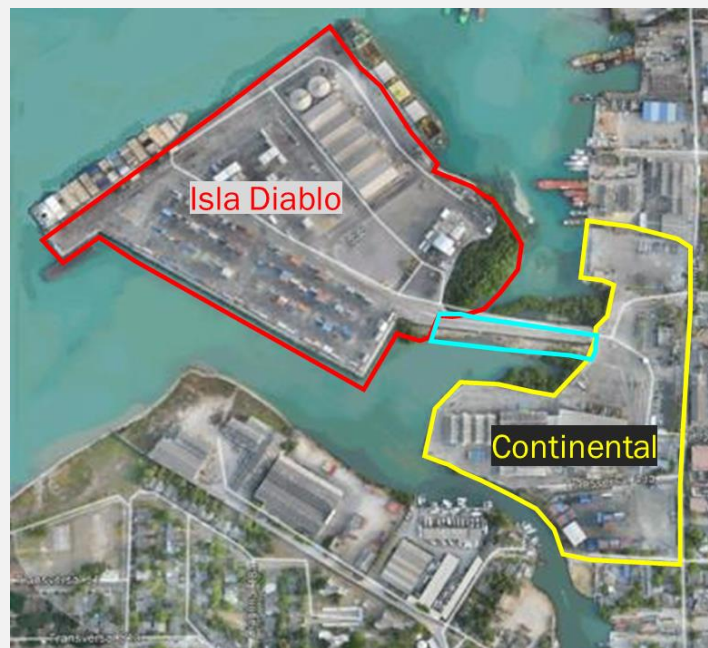
Fuente. Compas, 2023.

4.6 Infraestructura del puerto Compas Cartagena.

La infraestructura general del puerto de Cartagena está dividida en el área continental y el área de la isla Diablo, unida por un puente en terraplén con rodadura asfaltada. En el área continental se encuentran edificios administrativos, bodegas, accesos al puerto, áreas de tránsito y de inspección de carga. En la isla Diablo se encuentra el área industrial principal del puerto. Figura 8.

Figura 8.

Distribución de la infraestructura del puerto Compas Cartagena.



Nota: Área continental (amarillo), área de la Isla Diablo (rojo) y vía de conexión terraplén con rodadura en asfalto. *Fuente.* Elaboración propia a partir de Compas, 2023.

Área continental

- Once (11) edificios de administración, seguridad, almacén general-casino-oficinas, módulo primario, CCTO, apartamento de antinarcóticos, Casablanca con oficinas de trabajo y salas de reuniones y de archivo.
- Patio 03. Báscula de ingreso. Área de 14.849,89 m²
- Patio 04. Comerpes. Área de 8.464,50 m²
- Patio 05. Contenedores vacíos. Área de 10.559,64 m²
- Patio 06. Área bodegas. Área de 9.391,12 m²
- Área destinada a la inspección de carga de 5.451 m²
- Bodega 01. Almacenamiento de carga de café. Área de 562 m²
- Bodega 02. Carga general. Área de 1118 m²
- Bodega 03. Carga IMO. Área de 277,1 m²

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- Bodega 04. Carbonato. Área de 2536,4 m²
- Bodega 05. Carga general. Área de 1118 m²
- Bodega 06. Carga general. Área de 1118 m²
- Bodega 07. Carga general. Área de 1118 m²
- Bodega 08. Aprehensión y abandono. Área de 810,07 m²
- Bodega 09. Cobertizo de inspección, área cubierta de 2.563 m², con oficinas, muelle de llenado y vaciado de contenedores, equipos de inspección tipo escáner.
- Dos (2) casetas de Básculas.
- Área de circulación y maniobras (tránsito) de 3.090 m²

Área Isla Diablo

- Patio 01. Contenedores Sur. Área de 31248,26 m²
- Patio 02. Isla Central. Área de 65616,97 m²
- Muelle 1. Muelle en concreto reforzado sobre pilotes, Área de 5921,19 m²
- Muelle 2. Construido en tablestaca metálica. Área de 3908,54 m²
- Muelle 3. Construido en tablestaca metálica. Área de 3908,54 m²
- Muelle 4. Muelle en concreto reforzado sobre pilotes y en tablestaca metálica.
- Cinco (5) Silos horizontales 01-05. Área de 7447 m².
- Dos (2) Silos verticales metálicos de fondo plano. 01-02. Área de 2509,1 m²

4.7 Análisis del sector portuario.

El comercio mundial depende en gran medida de la logística y el transporte marítimo, que movilizan alrededor del 84 % de los insumos y productos comerciales a nivel global a través de operadores portuarios. Esta tendencia es la misma para América Latina y el Caribe, especialmente en los países de América del Sur, que contribuyen aproximadamente con el 17 % del total mundial de cargas marítimas (Sánchez R. &, 2021). Según la Comisión

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en un comunicado de prensa sobre el Informe de actividad portuaria de la región, se destaca que los diez países que más aportan al volumen total de carga operada (representando el 81,0 % del movimiento regional) son, en orden de relevancia: Brasil, Panamá, México, Chile, Colombia, Perú, Ecuador, República Dominicana, Argentina y Jamaica. En este contexto se resalta la importancia del sector portuario en la dinámica de las cadenas logísticas, en especial del suministro y distribución de mercancías vitales como los alimentos y medicamentos (CEPAL, 2020).

El comercio internacional por vía marítima experimentó un crecimiento constante hasta 2019, alcanzando un récord histórico de 11,860 millones de toneladas métricas. Sin embargo, la pandemia de COVID-19 impactó significativamente en 2020, con una disminución del 17.7 % en el comercio mundial de bienes. América Latina y el Caribe fueron las regiones más afectadas, registrando contracciones del 26.1 % y un 27.4 % en exportaciones e importaciones, respectivamente.

En el año 2021, América Latina experimentó una recuperación significativa en el manejo de contenedores, superando los niveles prepandémicos en un 2.5 %. A escala global, la recuperación alcanzó un 3.2 %, con un volumen total de 11,000 millones de toneladas, según lo reportado en el Informe del Transporte Marítimo 2022 de la UNCTAD. No obstante, estas cifras aún no han retornado a los indicadores previos a la pandemia. Persisten incertidumbres derivadas de diversos factores, incluyendo conflictos geopolíticos, cierres temporales de instalaciones portuarias, presiones inflacionarias, movimientos laborales y los efectos del cambio climático en diversas regiones. (Naciones Unidas, 2022).

En las perspectivas a mediano plazo, la UNCTAD pronostica un crecimiento anual del comercio marítimo del 2.1 % para el período 2023-2027, aunque a un ritmo más lento que el promedio de los últimos treinta años. En Colombia, la carga movilizada disminuyó un 2.1 %

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

en 2022, pero se espera un aumento en 2023 con incentivos como la reducción del flete de transporte marítimo, sujeto a factores externos como la tasa de cambio y la coyuntura internacional (Supertransporte, 2023).

La actividad portuaria es vital para Colombia, representando cerca del 90 % del comercio exterior y aproximadamente el 25 % del PIB del país (Fonseca, 2021). Con más de 150 puertos en dos litorales, destacando zonas como Santa Marta, Barranquilla y Cartagena, el terminal Compas Cartagena es el principal puerto para la movilización de contenedores, representando el 54 % de las toneladas movilizadas. A pesar de la disminución en 2020 debido a la pandemia, se registró un incremento del 40 % en graneles no comestibles, gracias a la reactivación de cargas de yeso y clínker, demostrando resiliencia y adaptación. (Compas, 2020). En el año 2022, el terminal Compas Cartagena demostró su relevancia al movilizar un total de 1,397,969 toneladas, consolidándose como el quinto puerto con mayor capacidad dentro de la sociedad portuaria de Cartagena. Su contribución representó el 1.4 % del total de toneladas movilizadas a nivel nacional, ratificando su gran capacidad para el desarrollo de la cadena logística a nivel regional y nacional (Supertransporte, 2023).

5 MARCO DE REFERENCIA

En el marco teórico, se abordan los conceptos fundamentales relacionados con el clima, la variabilidad climática, las variables que describen el tiempo atmosférico, así como la recopilación de datos meteorológicos vinculados al cambio climático y al calentamiento global. Estos elementos se consideran como desencadenantes de las fluctuaciones del nivel del agua y de los fenómenos atmosféricos extremos que afectan a las zonas costeras y a los puertos marítimos.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Asimismo, se examinan los conceptos que permiten evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura de Compas Cartagena, así como de las personas que trabajan en el puerto, la carga transportada y el funcionamiento de la terminal frente a los desafíos del cambio climático, tomando en cuenta su posición geográfica y la dinámica natural de su entorno.

De manera similar, se definen las medidas que la industria portuaria internacional adopta para mitigar los riesgos planteados por los fenómenos climatológicos y para adaptar su infraestructura ante los desafíos ocasionados por el cambio climático.

5.1 El clima, el cambio climático y sus implicaciones en la zona portuaria de Cartagena

El clima terrestre surge de la interacción entre los elementos del sistema climático, que incluyen la atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biosfera, y son influenciados por la dinámica térmica de los gases y el agua en la baja atmósfera (IPCC, 2021). En términos generales, el clima se refiere al comportamiento promedio y estadístico de estas variables en períodos que abarcan desde 20 o 30 años hasta millones de años en una región determinada, estas variables son temperatura atmosférica, precipitación pluviométrica (lluvia) y vientos, también se considera la presión y la humedad atmosférica (WMO, 1992).

La mayor parte de los fenómenos climáticos que definen el ciclo del agua resultan de los procesos convectivos, cambios de presión y temperatura generados por el calentamiento, expansión, ascenso y enfriamiento de los gases presentes en el sistema climático. Estos gases incluyen principalmente nitrógeno (78 %) y oxígeno (21 %), así como vapor de agua y en menor proporción los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄). Estos GEI, a lo largo de la historia geológica de la Tierra, han permitido la retención y regulación del calor mediante la radiación solar y el vulcanismo (Pallmall, 2021).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La Variabilidad Climática, “denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos” (IPCC, 2013, pág. 202). Estos cambios pueden ser causados naturales o ser del tipo externa producida por acción humana.

El Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021) indica que el cambio climático es “la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos” (IPCC, 2013, pág. 188). Se refiere a la alteración de los promedios estadísticos de las variables climáticas a escala global cuya persistencia o tendencia superan un umbral establecido; son causadas por anomalías naturales o externas (antropogénicas) evaluadas desde décadas a miles de años.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (FCCC), en su Artículo 1 (1992), define el Cambio Climático como la modificación en el clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que afecta la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada en períodos de tiempo comparables. Según esta perspectiva, la FCCC distingue entre el Cambio Climático, vinculado a acciones humanas, y la Variabilidad Climática, que se atribuye a causas naturales.

Para el IPCC (2021), el Calentamiento Global es el “aumento estimado de la temperatura media global en superficie promediada durante un período de 30 años, o durante el período de 30 años centrado en un año o decenio particular, expresado en relación con los niveles preindustriales” (IPCC, 2018, pág. 78) Los niveles preindustriales se refieren a la

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

magnitud de las variables meteorológicas con relación al período 1850-1900 y que se toman como referencia.

5.2 El cambio climático global

La temperatura media de la Tierra se mantuvo estable en torno a 14 °C durante mil años hasta el siglo XIX. Desde entonces, ha experimentado un aumento inusual y progresivo. Los estudios indican que la principal causa de este cambio climático y calentamiento global es el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera.

Se toma el año de 1750 como año de referencia para la medida base de las concentraciones de GEI para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (FCCC, 2022).

Las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, han incrementado las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera desde la Revolución Industrial invernadero y elevando la temperatura del planeta (FCCC, 2022) (Pallmall, 2021), (IPCC & Masson-Delmotte, 2021).

Este aumento es el principal factor del calentamiento global, que ha provocado cambios en el ciclo hidrológico (aumento de lluvias y nevadas, sequías), derretimiento de glaciares y casquetes polares, menor congelamiento estacional, aumento del nivel del mar, cambios en los vientos e intensificación de eventos climáticos extremos como El Niño y La Niña. (IPCC, 2007), (IDEAM, 2017).

La temperatura global ha aumentado $1,15\text{ °C} \pm 0,13\text{ °C}$ desde la era preindustrial, y los años 2015 a 2022 han sido los más cálidos (FCCC, 2022), de no reducirse las emisiones de GEI, es probable que la temperatura alcance $1,5\text{ °C}$ entre 2030 y 2052, con graves consecuencias para el planeta.(IPCC, 2022).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

El nivel medio del mar se estima que ha sido de unos $3,4 \pm 0,3$ mm/año entre las décadas de 1990 a 2010, con un incremento a 4,4 mm/año hasta 2022. (FCCC, 2022). Las causas principales son la expansión térmica por el incremento de la temperatura del agua en los océanos y el aumento de cantidad de agua en los océanos por fusión del hielo en los continentes. (IPCC, 2007).

El aumento de la temperatura marina por encima de los $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ va generalmente acompañado de un aumento del vapor de agua en la troposfera inferior y de energía estática húmeda que alimenta la convección y ráfagas de viento, propiciando la formación de depresiones y tormentas tropicales, huracanes y tifones. La frecuencia de estos eventos meteorológicos extremos varía considerablemente de un año a otro, pero los datos indican aumento sustancial en intensidad y duración desde la década de 1970. (IDEAM, UPME, 2017)

5.2.1.1 El cambio climático en el Caribe y el puerto de Cartagena

Los datos climáticos arrojan que en la zona tropical de América Latina se han producido los mayores incrementos en la temperatura media de 1901-2012, esta condición ha desatado un aumento significativo en frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos y meteorológicos extremos como huracanes, lluvias torrenciales que han ocasionado inundaciones, pérdidas humanas y económicas de gran envergadura. (IPCC, 2012 citados por CEPAL & Magrin, 2015).

Cartagena presenta un clima cálido árido, con una temperatura media de $27,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($25.1\text{-}31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), con una precipitación anual de 1087,0 mm, está controlado por los vientos Alisios, la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), el sistema de baja presión del Darién,

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

las ondas tropicales del Este y con influencia directa o indirecta de ciclones tropicales. (CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe). (Dimar, 2020)

Para la zona del mar Caribe, en general, los pronósticos para el fin del siglo XXI estiman un aumento medio en la temperatura de 2,5 °C (rango 1,5° a 5,0 °C), una disminución del 10 % en las precipitaciones medias anuales (rango -25 % a un + 10 %), especialmente en el verano. (IDEAM, 2015).

5.3 Análisis de la vulnerabilidad ante el cambio climático

El cambio climático constituye uno de los desafíos más importantes a los que se enfrenta la industria portuaria en la actualidad en todo el mundo y particularmente en el caribe colombiano.

Hacer la evaluación y análisis de la vulnerabilidad del sector portuario en el caribe colombiano exige implementar metodologías internacionales y nacionales enfocadas a los requerimientos especiales requeridos dada la ubicación geográfica de las terminales marítimas.

De acuerdo con la norma NTC-ISO 14091, el informe AR4 del IPCC describe la vulnerabilidad como el grado en el que un sistema es propenso e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático incluyendo la variabilidad y eventos extremos en tipo, magnitud e intensidad, así como el ritmo de la variación meteorológica a los que está expuesto un sistema o ecosistema evaluado respecto a su sensibilidad y capacidad adaptativa. (ICONTEC, 2021).

En este documento se emplea la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para el análisis de la vulnerabilidad el Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016)

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

con el objetivo de evaluar que tan vulnerable es el puerto en el puerto Compas Cartagena como sistema, ante la ocurrencia de amenazas respecto a la infraestructura portuaria; la operación, la integridad de la carga y la salud de las personas que laboran en la terminal. Esta metodología que se basa en el análisis de vulnerabilidad al cambio climático o a la variabilidad climática para proyectos, obras y actividades (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

5.3.1 Componentes de la evaluación de la vulnerabilidad

Evaluar la vulnerabilidad al cambio climático es un proceso complejo que implica la interacción de varios factores que determinan cuán susceptible es un sistema a las condiciones meteorológicas. Como tal, no existe una regla estricta para cuantificar la vulnerabilidad, por lo que se hace una evaluación de la vulnerabilidad en lugar de una medición.

El "Vulnerability Sourcebook" proporciona un marco conceptual para evaluar la vulnerabilidad de un sistema frente a las condiciones físicas impuestas por la variabilidad y el cambio climático en su entorno, las cuales se presentan como amenazas potenciales. Este enfoque se fundamenta en la definición, descripción y análisis de cuatro componentes esenciales: exposición, sensibilidad, impacto potencial y capacidad adaptativa.

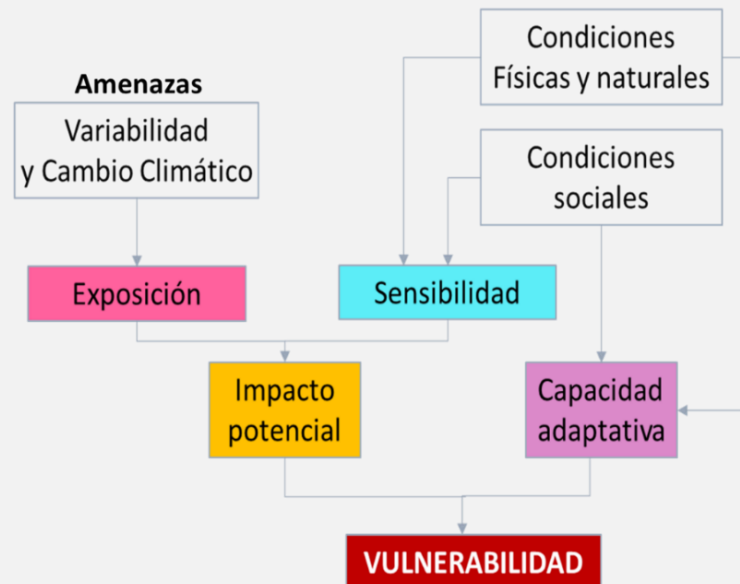
Dicha metodología se alinea con el concepto de vulnerabilidad establecido en el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). La integración de estos componentes permite elaborar un diagnóstico comprehensivo de la vulnerabilidad del sistema en cuestión, facilitando así la identificación de áreas críticas con el objeto de formular soluciones específicas a problemas identificados y ajustados a las necesidades. (Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, 2014).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La interrelación de los componentes que permiten evaluar la vulnerabilidad se muestran en la Figura 9.

Figura 9.

Componentes de evaluación de la Vulnerabilidad.



Fuente. Elaboración propia a partir de Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, (2014).

5.3.1.1 La amenaza

La amenaza se considera "Fenómeno o acontecimiento peligroso o arriesgado, natural o antrópico que puede causar daño físico, pérdidas económicas o poner en peligro la vida humana y el bienestar social y económico de una región". (Lacabra, Lozano, Alonso, & Fontalvo, 2003, pág. 22).

La Tabla 2 muestra los reportes de amenaza que han tenido mayor incidencia en los departamentos costeros de Colombia. (Lacabra, Lozano, Alonso, & Fontalvo, 2003).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 2.

Amenazas reportadas en departamentos costeros

Amenaza	Bolívar	Antioquia	Chocó	Magdalen	S. Andrés	Atlántico	Guajira	Nariño	Cauca	Valle del Cauca	Córdoba	Sucre
Vendaval	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Inundación	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Erosión	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mar de leva	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Tormenta eléctrica		X	X	X	X	X	X	X				
Sismo	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
Sequía	X			X	X		X					
Variación del nivel del mar	X	X	X									

Fuente. Elaboración Propia 2023. Basado en Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2016), Lacambra, Lozano, Alonso, & Fontalvo, (2003).

Las variables que caracterizan las condiciones meteorológicas potencialmente amenazantes en una región se definen por una serie de parámetros que involucran el tipo, magnitud, intensidad, duración y la confluencia de fenómenos meteorológicos tales como las tormentas tropicales, o eventos naturales de tipo sísmico o eruptivo.

A estas variables pueden atribuirse condiciones específicas (Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, 2014) (IPCC, 2007) que hacen que la dinámica meteorológica supere las condiciones normales de diseño o funcionamiento de un elemento. Esto puede provocar un deterioro o daño parcial o total del material, así como efectos adversos para la salud humana o medioambiental.

Estas condiciones suponen una amenaza para el sistema, como las precipitaciones de leves a intensas, las olas de calor, los vientos fuertes y los fenómenos combinados derivados de una tormenta tropical o un huracán. La exposición y el impacto de estos sucesos dependen de su ubicación y de su diseño estructural u operativo.

5.3.1.2 **Exposición.**

La exposición se refiere a la predisposición dada por la ubicación propia y el entorno del objeto de análisis respecto a la ocurrencia o trayectoria de una condición amenazante. “La presencia de personas; medios de vida; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos medioambientales; infraestructuras; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente. (Cardona, y otros, 2012, pág. 69).

En el caso específico de los puertos, la exposición es crucial dada la ubicación de su infraestructura en zonas costeras, la ocurrencia de fenómenos climáticos recurrentes y extremos asociados al cambio climático.

Se relaciona con la probabilidad de ocurrencia (PO) de una amenaza ocurra y que la parte del sistema analizado se impacte, así como la recurrencia con la que suceda en términos de frecuencia a lo largo del año, basada en los registros meteorológicos disponibles, fuente de información para establecer una frecuencia de recurrencia que permita establecer una calificación de probabilidad en categorías. (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

5.3.1.3 **Sensibilidad**

La sensibilidad determina la estimación de la afectación, adversa o no, de un determinado suceso relacionado con las condiciones meteorológicas presentes, suele determinarse en términos de las condiciones físicas o naturales del sistema como ubicación geográfica, diseño y construcción estructural, condiciones de los sistemas de drenaje y el terreno, así como de los ecosistemas inmersos. (Deutsche Gesellschaft fur internationale Zusammenarbit GIZ GmbH, 2014). (IPCC, 2007)

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La sensibilidad se relaciona con la estimación de las afectaciones potenciales del sistema portuario ante la materialización de una o varias amenazas, es decir, las consecuencias esperadas (CE). (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

5.3.1.4 **Impacto potencial**

Los posibles impactos causados por la ocurrencia de las amenazas meteorológicas se determinan mediante la combinación de la exposición y la sensibilidad, mediante el cálculo del índice de riesgo climático empresarial (IRCE) (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

Estos impactos a su vez pueden desencadenar otros indirectos, afectando no solamente la esfera física, ecosistema, económica, sino también a la social.

5.3.1.5 **Capacidad adaptativa**

El AR4 del IPCC describe el concepto de capacidad de adaptativa como habilidad que posee un sistema para ajustar su funcionamiento de manera exitosa ante los desafíos planteados por la variabilidad y cambio climáticos o sus fenómenos extremos, basada en su capacidad física, constructiva, de diseño, recursos y tecnologías para evitar o resistir daños potenciales y aprovechar oportunidades las condiciones cambiantes para hacer frente a las consecuencias futuras (Deutsche Gesellschaft fur internationale Zusammerinarbit GIZ GmbH, 2014), (IPCC, 2007).

La capacidad adaptativa congrega los factores de un sistema para generar medidas que permitan fortalecer las debilidades identificadas aumentando su resiliencia, por lo cual es indispensable integrar los recursos económicos, estructurales, tecnológicos y socioeconómicos. (Deutsche Gesellschaft fur internationale Zusammerinarbit GIZ GmbH, 2014). (IPCC, 2007).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

En la presente evaluación de la vulnerabilidad, esta propiedad se identifica como Capacidad Adaptativa (CA) en la metodología del MADS. (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

5.3.1.6 **La Vulnerabilidad.**

La vulnerabilidad es una condición objeto no cuantificable en sentido estricto como medida estándar, pero sí, objeto de evaluación que expresa la interacción de factores que permiten calcular la susceptibilidad al impacto en caso de que un evento adverso que se presente.

Se refiere a la propensión o predisposición a verse afectada negativamente por eventos climáticos, por lo que es objeto de evaluación y no de medición. (Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, 2014).

La gestión de vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático se basan en la previsión y control de la exposición, además del aumento de la resiliencia intrínseca del sistema evaluado. Por otro lado, la mitigación permitiría la reducción del incremento de la probabilidad de ocurrencia de amenazas consecuencia del cambio climático mundial a un largo plazo. (Sánchez & Reyes, 2015).

5.3.2 ***La reducción de la vulnerabilidad y adaptación ante el cambio climático***

Schipper y Pelling (2006) promueven una estrategia completa en la lucha contra el cambio climático, que incluye tanto la reducción de emisiones como la adaptación a sus consecuencias.

En el aspecto de reducción, se busca disminuir la vulnerabilidad del sistema portuario y de las comunidades locales ante amenazas naturales, incorporando medidas como la

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

transición a energías renovables y la mejora de la eficiencia energética. En cuanto a la adaptación, se enfoca en ajustar la infraestructura mediante acciones como el reforzamiento, rediseño o construcción resiliente, así como el ajuste de los procedimientos operativos acorde con las necesidades.

5.3.3 *Medidas de adaptación con el cambio climático en los puertos*

En el marco del cambio climático, la adaptación de los puertos para fortalecer su resiliencia es un desafío. Este proceso de adaptación implica una planificación estratégica a corto y largo plazo, que abarca tanto intervenciones de naturaleza robusta como aquellas de índole más flexible.

En este sentido, los puertos pueden implementar medidas de bajo costo como primera línea de defensa para mitigar los riesgos climáticos y aumentar su resiliencia, antes de recurrir a obras de ingeniería. Es esencial que los diseñadores y planificadores portuarios consideren el cambio climático en las fases iniciales de sus planes, anticipándose a un futuro caracterizado por la incertidumbre. (Becker A. M., 2013).

Según la *Australian Greenhouse Office-AGO*, la adaptación al cambio climático es “acciones en respuesta al cambio climático que conducen a una reducción de los riesgos o a la generación de beneficios” ((AGO), 2006, pág. 70). Se disponen de diversas medidas para ajustar los puertos al cambio climático, siendo muchas de estas detalladas en la Tabla 3 y obtenidas a partir de la información proporcionada por la National Climate Change Adaptation Research Facility (McEvoy D, 2013):

Tabla 3

Tipos de medidas de adaptación

Área	Descripción medida de adaptación
------	----------------------------------

Tecnológicas	<p>Inversión en tecnología que aumente la capacidad operativa de los equipos y mejorar la resiliencia portuaria.</p> <p>Adopción de sistemas de refrigeración para abordar el aumento de temperaturas y exploración de opciones energéticamente eficientes.</p> <p>Utilización de energías renovables y de bajas emisiones para distintas funciones, reduciendo los riesgos asociados a cortes de energía y adaptarlos a las exigencias ambientales.</p> <p>Automatización de los procedimientos logísticos, sistemas de monitoreo y alerta temprana.</p> <p>La compra de equipos como grúas y cintas transportadoras debe ser evaluada teniendo en cuenta la vida útil prevista de dichos equipos y las condiciones climáticas futuras a las que estarán expuestos.</p> <p>Adaptar las instalaciones de almacenamiento a los eventos meteorológicos extremos.</p> <p>Optimizar los sistemas de drenaje para hacer frente a eventos de lluvia intensos</p>
Ingenieriles	<p>Monitoreo batimétrico de áreas de aproximación y atraque acorde con profundidad de calado requerido.</p> <p>Incrementar la altura de los diques de acuerdo con las demandas de las condiciones marítimas y verificar si es esencial reconfigurarlos para enfrentar situaciones de oleaje impredecibles.</p> <p>Verificación de capacidad de sistemas de drenaje en patios, muelles y áreas de maniobras ante eventos por precipitaciones extremas.</p>
Mantenimiento y diseño	<p>Garantizar que en los diseños futuros de todas las infraestructuras portuarias se consideren adecuadamente los factores relacionados con el cambio climático, como la pluviosidad, el nivel del mar y las tormentas.</p> <p>Sistema de gestión de bienes e infraestructuras que incluya su ciclo de vida y los regímenes de deterioro de los materiales.</p> <p>Colaborar estrechamente con las autoridades locales para desarrollar una cadena de suministro que incluya la planificación y diseño de centros</p>
Planificación	<p>logísticos interconectados, que sean resistentes a los impactos del cambio climático relevantes.</p> <p>Efectuar investigaciones sobre la diversificación del comercio hacia productos que sean más resistentes a las condiciones climáticas adversas.</p> <p>En ciertas ocasiones, hay riesgos que no se pueden mitigar, por lo que se opta por la subcontratación de dichos riesgos a compañías de seguros.</p>
Seguros	<p>Mediante esta colaboración, es posible identificar los elementos que son susceptibles a riesgos climáticos y que los puertos no pueden reducir por sí mismos.</p>

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Sistemas de gestión	Incorporar sistemas de gestión que abarquen la gestión ambiental, de emergencias y de riesgos. Asimismo, es fundamental actualizar las políticas de cambio climático en todos los sistemas de gestión. Desarrollar planes de contingencia como parte del sistema de preparación y respuesta ante emergencias.
---------------------	--

Fuente. (McEvoy D, 2013).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

5.3.3.1 **Medidas de adaptación:**

Varios puertos marítimos ya han tomado medidas de adaptación y ofrecen valiosas lecciones sobre el desarrollo de mejores prácticas y se relacionan a continuación. Tabla 4:

Tabla 4

Medidas de adaptación en puertos internacionales

Puerto	Evaluación	Resultado	Medida de adaptación
Puerto de Avatiu, (Roratunga, Isla Cook)	Riesgo climático para el puerto de Avatiu y las infraestructuras conexas	Los ciclones que se prevé que aumenten en intensidad con el cambio climático crean el mayor riesgo para la infraestructura portuaria y conectada	Elevar los niveles de transporte o construir litorales defensas.
Puerto de Felixstowe, (Suffolk, Reino Unido)	Informe de adaptación al cambio climático Felixstowe Dock and Railway Company agosto de 2015	Mayor amenaza climática para el puerto de Felixstowe es el aumento del nivel del mar y las inundaciones. Se prevé elevación del nivel del mar y aumento de riesgo de inundación área.	Medidas para mejorar la resiliencia como la elevación de las defensas costeras, mejora de instalaciones de almacenamiento y planificación de la evacuación en caso de inundaciones. Mejora en infraestructura, muros de contención y sistemas de drenaje. Planificación de emergencia; fortalecimiento de los muelles, instalación de pilotes, refuerzos estructurales.
Muelles el Bosque, Cartagena (Colombia)	Riesgo climático y negocios Puertos Terminal Marítimo Muelles el Bosque Cartagena Colombia	Tormentas tropicales, huracanes, marejadas ciclónicas, elevación de los niveles del mar, temperaturas extremas (olas de calor)	Mejora en infraestructura, muros de contención y sistemas de drenaje. Planificación de emergencia; fortalecimiento de los muelles, instalación de pilotes, refuerzos estructurales.
Puerto de Seattle (WA, EE. UU)	Planificación de la subida del nivel del mar: estado actual de la ciencia, vulnerabilidad de las propiedades del puerto de Seattle a la subida del nivel del mar y posibles estrategias de adaptación.	Se estima que para el año 2100, el nivel del mar aumente aproximadamente 1 metro en la costa de Seattle, afectando las zonas más bajas de la infraestructura portuaria como los muelles y los depósitos, altamente vulnerables a inundaciones.	La elevación de la infraestructura, la protección costera, el desarrollo de infraestructura resistente al clima y la promoción de prácticas sostenibles.
Puerto San Diego	Repercusiones del cambio climático y la subida del nivel del mar en los puertos y metodología coherente para evaluar la	Para el año 2100 se pronostica el aumento de las inundaciones en el puerto y en la jurisdicción de la bahía de San Diego, a causa de la elevación del nivel del mar, generando impactos en la infraestructura, la interrupción de las operaciones y daños generales.	Elevación de infraestructuras; protección costera (diques y muros de contención); restauración de humedales, manglares y/u otros ecosistemas costeros; desarrollo de infraestructuras resilientes a factores climáticos extremos.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Puerto	Evaluación	Resultado	Medida de adaptación
Puerto de Nueva York y Nueva Jersey	<p>vulnerabilidad y el riesgo.</p> <p>Estudio de caso: Evaluación de la vulnerabilidad de las instalaciones de la Autoridad Portuaria de Nueva York y Nueva Jersey a los efectos del cambio climático.</p>	<p>La mayor amenaza para la infraestructura portuaria de Nueva York y Nueva Jersey son las marejadas ciclónicas provocadas por eventos extremos, como huracanes o ciclones extra tropicales (noreste) junto con el aumento del nivel del mar.</p>	<p>Mantenimiento y operación: colocación de sacos de arena, bombas portátiles, compuertas temporales contra inundaciones, limpieza de sistemas de drenaje, reposicionamiento de material rodante y realización de estudios más detallados.</p> <p>Inversiones de capital: instalación de barreras contra inundaciones; elevar elementos de infraestructura crítica que superen la inundación proyectada; reubicación de instalaciones críticas a un terreno más alto.</p> <p>Estrategias regulatorias: Modificación de los códigos de construcción de la ciudad y los estándares de diseño. Desarrollar enfoque sistémico y detallado para la recopilación de datos para el monitoreo del clima y valoración de los impactos. Desarrollo de estándares para la construcción y adaptación de infraestructuras resilientes. Estrategias de transbordo, para transferir las operaciones logísticas más vulnerables a infraestructuras internas más resilientes, reduciendo el riesgo en infraestructura principal. Red portuaria colaborativa para la activación de desvíos o planes de contingencia ante eventos extremos.</p> <p>Ampliación y adaptación del muelle: Pilotes más profundos y sistemas para el mejoramiento de la resistencia de los pavimentos y elementos de amarre de los barcos.</p> <p>Protección costera: Construcción de rompeolas, muros de contención, diques u otras infraestructuras de protección.</p>
Port Kembla (Australia)	<p>Resiliencia de los puertos al cambio climático: cartografía de la vulnerabilidad a la subida del nivel del mar</p>	<p>Esta investigación desarrolló un modelo de visualización 3D para ayudar a mejorar la comprensión del impacto probable de los eventos climáticos extremos en las operaciones logísticas portuarias clave, con un enfoque particular en el aumento del nivel del mar, las marejadas ciclónicas y huracanes. Se estableció el índice de vulnerabilidad por tipo de maquinaria y áreas operacionales mayormente expuestas.</p>	
Port Louis (Mauricio)	<p>Ciudades del África subsahariana: Una red de cinco ciudades pioneras en la adaptación al cambio climático a través de la</p>	<p>Debido a que el puerto de Louis está ubicado geográficamente en el océano Índico lo hace vulnerable a fenómenos meteorológicos como los ciclones tropicales, los cuales han aumentado su frecuencia e intensidad en los últimos años, sin embargo, se dice que estos fenómenos serán cada vez más impredecibles debido al cambio climático.</p>	

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Puerto	Evaluación	Resultado	Medida de adaptación
Puerto de Manzanillo (México)	Puerto de Manzanillo: Gestión de riesgos climáticos	<p>Esta amenaza climática ocasiona fuertes vientos, lluvias torrenciales e inundaciones que pueden afectar significativamente la infraestructura portuaria y las operaciones de envío (daños en las carreteras y puentes que conectan el puerto con el resto del país).</p> <p>(i) Aumento en la intensidad de las lluvias provocará una mayor inundación de aguas superficiales de las conexiones internas por carretera y ferrocarril de acceso al puerto.</p> <p>(ii) Aumento de la sedimentación en la cuenca del puerto obligará a reducir el calado de los buques y el acceso a la terminal, debido a la mayor intensidad en las lluvias.</p> <p>(iii) Aumento en la intensidad de las lluvias causará un aumento de daños a la infraestructura y el equipamiento debido a las inundaciones</p>	<p>Monitoreo climático: Se ha implementado un sistema de monitoreo climático para medir las condiciones meteorológicas y del mar en tiempo real y alertar sobre posibles amenazas.</p> <p>Planes de contingencia: planes de emergencia y protocolos para la gestión de riesgos climáticos, incluyendo la identificación temprana de amenazas y la evacuación de áreas vulnerables. Revisar sistemas de alerta temprana de inundación e identificar áreas de mejora ante el incremento de riesgo debido al cambio climático.</p> <p>Monitorear los niveles de sedimentación y evaluar las tendencias históricas en la frecuencia y cantidades de dragado; actualizar los estándares de diseño para el equipo e infraestructura, tomando en cuenta el impacto potencial del cambio climático futuro sobre la vida de los activos.</p>

Fuente. Elaboración Propia 2023.

6 DISEÑO METODOLÓGICO

El método empleado en este estudio se caracteriza por la combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos con el propósito de evaluar la vulnerabilidad de un sistema ante los impactos del cambio climático, clasificándose como un enfoque mixto, según Sampieri & Torres (2018). Se obtienen datos cualitativos que abarcan diversos aspectos del sistema, como su operación e infraestructura, y se confrontan con datos climáticos cuantitativos que proporcionan

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

información estadística sobre variables como temperatura, precipitaciones y eventos extremos.

Al comparar estos conjuntos de datos, se facilita la identificación de patrones, la evaluación de la vulnerabilidad del sistema, su capacidad de adaptación y la formulación de medidas destinadas a promover la resiliencia climática.

6.1 Tipo de investigación

Este estudio tiene como objetivo evaluar la vulnerabilidad del Puerto Compas de Cartagena frente al cambio climático utilizando datos históricos, actuales y proyecciones de entidades especializadas en variables climáticas.

Se enfoca en temperatura, precipitaciones, nivel del mar en diferentes períodos, buscando patrones a lo largo del tiempo para guiar posibles medidas de adaptación. La investigación es aplicada, descriptiva, cuantitativa y correlacional, utilizando fuentes primarias y secundarias de evaluación ante las amenazas climáticas y su ubicación geográfica.

El objetivo final es identificar condiciones actuales y tendencias para formular medidas de adaptación enfocadas en el fortalecimiento de la resiliencia del sistema portuario.(Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

La investigación se compone de dos partes: la primera implica la recopilación de datos estadísticos sobre las variables meteorológicas provenientes de las estaciones cercanas a los puertos (Padilla & Pretel, 2021).

El segundo componente implica el cálculo del índice de riesgo climático empresarial utilizando el diagnóstico actual, seguido por la aplicación del análisis de vulnerabilidad según las

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

pautas proporcionadas por el Ministerio de Ambiente con la metodología del Plan de gestión del cambio climático para puertos marítimos de Colombia. (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

6.2 Análisis externo

Para el análisis externo de la compañía, se escoge la metodología de la matriz DOFA, herramienta que tiene cuatro cuadrantes que se utilizan para identificar las condiciones externas del entorno como oportunidades y amenazas (OA) y las condiciones internas del entorno como fortalezas y debilidades (FD), ayudando así, a reconocer el estado actual de la compañía, permite planificar estrategias que mejoren las condiciones. (Wheelen y Hunger 2013).

Adicionalmente, se examinan los registros históricos de fuente oficial de las principales variables meteorológicas que determinan el tiempo atmosférico, fenómenos, variabilidad y cambio climático en el entorno geográfico de un puerto marítimo, de la misma manera. Por otro lado, tiene en cuenta los registros del nivel medio del mar y las experiencias de puertos nacionales e internacionales para la gestión del cambio climático tanto para la evaluación de la vulnerabilidad como para la adopción de medidas de adaptación.

6.3 Análisis interno

El propósito del análisis interno consiste en examinar la información relativa a los recursos del puerto, la infraestructura y los informes de daños, retrasos, detenciones operativas y de seguridad en el trabajo, así como la percepción del personal interno, no solamente para detectar amenazas sino también para la formulación de soluciones.

Para la recopilación de datos, se implementó un cuestionario que recibió respuestas de 26 funcionarios con roles fundamentales. Estos participantes desempeñan funciones clave en la

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

toma de decisiones y representan a los principales grupos involucrados en la planificación estratégica y operativa del puerto.

La elección de los encuestados se llevó a cabo mediante la técnica de muestreo de bola de nieve, iniciando con altos directivos, gerentes de procesos, jefes y supervisores de operaciones. Esto garantizó que solo se invitara a los participantes más relevantes, asegurando así la máxima calidad de los datos recopilados.

La encuesta tuvo como objetivo explorar cinco (5) variables a través de preguntas, algunas de las cuales están diseñadas con la escala de Likert, la cual fue previamente validada por un grupo de expertos (Sampieri, Cap. 13, 2019).

La encuesta se complementó con una visita de campo, durante la cual se llevó a cabo un recorrido interno por la terminal portuaria. Además, se recopilaron datos específicos mediante listas de verificación adaptadas a cada área y se efectuaron entrevistas con cargos puntuales.

6.3.1 Población, muestra y ficha técnica

La adquisición de información a través de la encuesta permite obtener de manera organizada y cuantificable la incidencia de los hechos, condiciones y fenómenos derivados de la variabilidad climática y del cambio climático que constituyen en mayor medida como amenazas que impactan la infraestructura portuaria, las personas, la operación y la carga.

Como población para la aplicación del cuestionario electrónico se considera al grupo de colaboradores del puerto Compas Cartagena, personas que están involucradas dentro del mapa de procesos de la operación, ya sea en la parte operativa, administrativa, estratégica o de dirección. La población define de manera general a los individuos que cuentan con

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

características que los agrupan y sobre las cuales se espera hacer revisión de hechos, inferencias, predicciones, estimaciones o comprobar o descartar hipótesis. (Vargas Franco, 2007) ^[OBJ]

La muestra que se ajusta a las necesidades de información es del tipo muestreo no probabilístico por conveniencia, es decir, el subgrupo de personas que trabajan o han desarrollado labores en el puerto Compas de Cartagena, conocen ampliamente la operación, que por sus labores tienen la percepción de las amenazas asociadas con los eventos asociados al cambio climático, su impacto actual y futuro en la operación y manejo estratégico de la compañía.

De esta manera, como muestra se toma al personal técnico, profesional y directivo, es decir, 26 de los 120 colaboradores internos que hacen parte del recurso humano del puerto objeto del estudio, de acuerdo con este criterio de selección de la muestra el número de personas no se estiman mediante cálculo estadístico, sino por sus características, roles y responsabilidades. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

Para el instrumento de adquisición de información de primera mano se tiene la siguiente ficha técnica. Tabla 5.

Tabla 5.

Ficha técnica de la encuesta

Característica	Descripción
Período de recolección de datos	Julio de 2023
Ciudad de aplicación	Bogotá D.C. y Cartagena
Cargo de las personas consultadas	Directivos, gerentes, directores y supervisores de operación, directores de riesgos, HSE y sostenibilidad.
Población	220

Muestra	26
---------	----

Fuente. Elaboración propia a partir de Compas, (2023)

6.3.2 Identificación de las variables de la encuesta

La encuesta electrónica se contemplan las siguientes variables asociadas a la variabilidad climática, cambio climático, condiciones y capacidad de la infraestructura portuaria, y la gestión de Compas ante el cambio climático.

6.3.2.1 Amenazas

Se busca conocer cuáles son eventos climáticos extremos o no que tienen mayor incidencia de acuerdo con su tipo, magnitud y recurrencia en el puerto objeto del estudio y constituyen en una amenaza latente o potencial para el sector portuario.

6.3.2.2 Exposición

Esta variable permite identificar cuáles instalaciones están más expuestas de acuerdo con su localización, tipo de estructura y uso al deterioro o daño causado por las amenazas de los eventos climáticos y recurrencia con la que se presentan novedades a su integridad.

6.3.2.3 Sensibilidad

Permite conocer cuál es la respuesta estructural de las instalaciones portuarias ante las amenazas de los eventos climáticos, cuáles tienen mayor incidencia y frecuencia en su posible deterioro y en cuáles han sufrido eventos que han causado demoras o afectación de la operación. También permite conocer cuáles son los umbrales de operación segura de las instalaciones.

6.3.2.4 **Medidas de adaptación**

Permite conocer cuál es la capacidad de la infraestructura portuaria para adaptarse ante las amenazas climáticas, cuáles instalaciones han sido modificadas desde su diseño, requieren programas de mantenimiento periódicos o barreras construidas para mejorar su resiliencia ante las amenazas climáticas.

6.3.2.5 **Gestión**

Identifica las estrategias para la gestión de la vulnerabilidad y riesgos asociados a las amenazas del cambio climático, así como los planes de adaptación de infraestructura y los planes de contingencia operacional, implementación de prácticas sostenibles y gestión del conocimiento en la organización, así como el involucramiento de los grupos de interés.

6.3.3 *Instrumento de análisis interno*

Para el análisis se diseñó una encuesta que se aplicó a distintos colaboradores de Compas, que ostenten cargos tanto operativos, como administrativos y directivos. La intención de la encuesta fue conocer la percepción frente a las amenazas asociadas a variables climáticas, conocer de qué manera los ha afectado en sus labores, si las medidas de adaptación adoptadas hasta el momento son efectivas y cuáles consideran que son las más apropiadas para enfrentarse a los retos del cambio climático.

La encuesta se desarrolló a partir de un total de cinco (5) variables: amenaza, sensibilidad, exposición, medidas de adaptación y gestión, que se exploran a través de 14 preguntas enfocadas a su vez hacia todos los escenarios de amenazas posibles:

- Variabilidad del nivel del mar

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- Erosión
- Inundación
- Vendaval (ráfagas de viento)
- Tormenta eléctrica
- Sequía
- Sismo

Las opciones de respuestas se diseñaron en la escala de Likert.

6.3.4 Validación del instrumento de medición

El diseño del instrumento de adquisición de información de primera fuente mediante la encuesta electrónica requiere la validación de las variables de consulta, la estructura de la encuesta, enfoque conceptual, redacción de las preguntas y opciones de respuesta, y la relación entre las preguntas y la variable evaluada. Anexo 1.

Para esto se lleva a cabo la validación, se aplica la validación del coeficiente de Aiken donde como mínimo cinco expertos valoran la calidad del cuestionario planteado. Cada evaluador califica las preguntas formuladas con los siguientes criterios de evaluación: 1. Claridad de la redacción. 2. Enfoque de información que se espera obtener. 3. Facilidad de respuesta de la encuesta y 4. Relación, pregunta – variable. La calificación uno (1) considera que la pregunta está adecuadamente dirigida o con cero (0). Si la pregunta debe reformularse o mejorar su planteamiento en relación con la variable evaluada, se calcula el coeficiente V de Aiken con la relación:

$$V = \frac{S}{n(C - 1)}$$

Donde: S es la suma de respuesta de cada experto S_i

n es el número de jueces.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

c es el número de valores de la escala de evaluación.

1 calificación si la pregunta es adecuada según calificación del experto i .

0 calificación si la pregunta no se adecua o debe replantearse según calificación del experto i

El resultado del coeficiente está entre 0 a 1, un alto coeficiente Aiken indica mayor aprobación de los expertos. Si el coeficiente de Aiken es 1, se muestra unanimidad de aprobación. Por debajo de este valor, uno o más expertos consideran que la pregunta debe ser ajustada. (Mares Ruiz, 2020)

6.4 Diseño de la investigación.

Esta evaluación de la vulnerabilidad del puerto Compas Cartagena se ha realizado integrando la información regional, local y específica del puerto disponible. Incluye información sobre el contexto geográfico, así como datos históricos entre 2003 y 2022 de variables meteorológicas como temperatura superficial, precipitación (lluvia), velocidad del viento y humedad relativa. Los datos se obtuvieron de la Estación sinóptica principal del IDEAM en el Aeropuerto Rafael Núñez y de la estación del CIOH de DIMAR en la Isla Manzanillo, Cartagena.

La metodología de evaluación de la vulnerabilidad del puerto Compas Cartagena integra los planteamientos de la norma NTC-ISO 14091 (ICONTEC, 2021), el informe AR4 de IPCC (IPCC, 2007), con el libro de consulta sobre la vulnerabilidad (Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, 2014) y el Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

6.4.1 Adquisición de información de campo.

El equipo de trabajo visitó la terminal Cartagena entre el 23 al 25 de mayo de 2023, con el objetivo de observar la infraestructura, dinámica operacional, el tipo de carga transportada, identificación de posibles impactos por eventos meteorológicos, las condiciones de seguridad y salud en el trabajo. Se identificaron variables meteorológicas, posibles causas y consecuencias además de contactar personal interno para comprender su visión e implementar el instrumento de consulta interna.

6.4.2 Análisis de variables meteorológicas y mareográficas.

Para determinar el comportamiento estadístico variables meteorológicas asociados a la variabilidad y cambio climático y que pueden constituir amenazas a la terminal, se obtuvieron los registros meteorológicos de temperatura (°C), humedad relativa, lluvia (mm/día), velocidad del viento (km/h), nivel del mar (m) de estaciones de datos oficiales de las estaciones IDEAM para un periodo de 20 años y DIMAR para un espacio de 10 años, respectivamente.

Se emplearon técnicas estadísticas para describir los valores medios, máximos y mínimos y su variabilidad anual, estadísticas analíticas para evaluar las tendencias y los cambios a lo largo del tiempo, así como rangos de definición de fenómenos climáticos.

El análisis incluyó valores típicos y atípicos, variabilidad natural y correlación con reportes de daños, afectaciones a la carga y operaciones. Esto permitió establecer umbrales y magnitudes de amenaza climática.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

De manera complementaria, se emplea la estimación de nivel del mar para escenarios futuros el modelo de elevación digital de Climate Central basada en datos de la misión de topografía de radar SRTM de la NASA, que emplea un modelo de proyección de análisis de áreas con amenaza por el aumento en el nivel medio del mar en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para los periodos de 2050 y 2100.

Estos mapas se basan en conjuntos de datos sobre elevación de la superficie marina y mareas, además de proyecciones de tasas de elevación del nivel del mar, es decir, deben tomarse como un estimativo global que debe correlacionarse con mediciones locales para su corrección y mayor precisión. (Climate Central, 2021).

6.4.3 Evaluación de la vulnerabilidad

La evaluación de la vulnerabilidad permite comprender las relaciones causa/efecto relacionada al cambio climático y su impacto en las personas, sectores económicos y los sistemas socio ecológicos.

La vulnerabilidad del puerto de Compas Cartagena se realiza a partir de la definición de las amenazas con base en el análisis la información interna de las personas que laboran y dirigen el trabajo en el puerto, en contraste con los datos históricos y estadísticos de variables meteorológicas de temperatura, precipitaciones (lluvias), velocidad del viento y nivel del mar siguiendo para esto la metodología planteada en el Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016) que tiene como pilares principales los cálculos semicuantitativos del Índice de riesgo climático empresarial (IRCE) y la Vulnerabilidad Climática Empresarial (VuCE).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

El IRCE aborda tres componentes:

1. La Probabilidad de Ocurrencia (PO)
2. Las Consecuencias Esperadas (CE)
3. El impacto potencial.

El cálculo del IRCE emplea la Ecuación 1, (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016):

Ecuación 1.

Cálculo del Índice de riesgo climático empresarial IRCE

$$IRCE = PO * CE$$

La calificación cuantitativa del índice de riesgo climático empresarial expresa la posibilidad de que la amenaza genere un impacto y daño potencial de los componentes del sistema portuario que permiten su operación de manera eficiente, segura, estable y a largo plazo en concordancia con el plan estratégico de la organización. Los valores obtenidos permiten caracterizar el riesgo, desde despreciable hasta muy alto y la priorización de las acciones para su reducción, desde acciones no requeridas hasta urgencia en evaluación de medidas. Tabla 6.

Tabla 6.

Magnitud del Índice de riesgo climático empresarial IRCE

Riesgo	Magnitud	Categoría	Tipología	Priorización
Despreciable	0	0	R0	Riesgo despreciable
Muy bajo	0-20	1	R1	No necesario evaluar acciones
Bajo	21-30	2	R2	Seguimiento necesario, no tanto evaluar acciones
Medio	31-50	3	R3	Recomendable evaluar acciones
Alto	51-90	4	R4	Necesario evaluar acciones
Muy alto	>90	5	R5	Urgente evaluar acciones

Fuente Elaboración propia a partir de MADS, Invemar, Mintransporte, 2016.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La capacidad adaptativa de un sistema o componente se refiere a la fortaleza estructural para reducir su vulnerabilidad ante amenazas relacionadas meteorológicas y del cambio climático.

La habilidad de aprovechar fortaleza estructural, de diseño o el modo en el que emplea en sus procesos operativos permiten enfrentar efectos adversos mediante el fortalecimiento físico, optimización de recursos, integración de tecnología, innovación y buenas prácticas. El objetivo es aumentar la resiliencia del sistema en su conjunto ante condiciones meteorológicas cambiantes y extremas.

La vulnerabilidad climática empresarial (VuCE) se encuentra en función de la probabilidad de ocurrencia de un riesgo IRCE frente a la Capacidad de Adaptación actual (CA).

Ecuación 2.

Ecuación 2.

Ecuación para el cálculo de la Vulnerabilidad Climática Empresarial, VuCE.

$$VuCE = IRCE * CA$$

Los valores de VuCE varían entre 0 y 1000 y se categoriza el grado de vulnerabilidad de cada aspecto evaluado con el propósito de formular las estrategias, medidas y acciones de adaptación a corto y mediano plazo de acuerdo con la priorización dado por el riesgo y la magnitud de la vulnerabilidad. Tabla 7. (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

Tabla 7.

Vulnerabilidad Climática Empresarial VuCE

Riesgo	Magnitud	Clase	Tipología
Muy alto	>700	5	V5

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Alto	>500 - 700	4	V4
Medio	>300 - 500	3	V3
Bajo	>100 - 300	2	V2
Muy Bajo	>0 - 100	1	V1
Despreciable	0	0	V0

Fuente Elaboración propia a partir de MADS, Invemar, Mintransporte, 2016.

7 RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD

7.1 Análisis Variables Externas

El análisis descriptivo y modelo analítico estadístico de variables meteorológicas y del nivel medio del mar permiten comprender la variabilidad climática y su interacción con la geografía de la zona portuaria. En este enfoque se revisan los datos mediante, máximos, mínimos, recurrencia, medidas de tendencia central y dispersión con representaciones gráficas, permitiendo identificar patrones y anomalías en series temporales.

7.1.1 Análisis estadístico de variables meteorológicas

Dados los datos obtenidos la fuente primaria de la Estación Sinóptica principal del IDEAM del Aeropuerto Rafael Núñez de las variables temperatura (temperatura máxima diaria), precipitación diaria (mm/día), velocidad máxima del viento (km/h) entre 2003 a 2022 y nivel del mar (m) con datos de la Estación Manzanillo del CIOH de la DIMAR entre 2013-2022.

En cuanto a la imputación de los datos con base en los datos existentes, se tiene que los datos faltantes en las series temporales de periodicidad mensual se han imputado mediante la técnica LOESS. (Dancho & Vaughan, 2023).

Esta imputación mejora la precisión de estadísticas descriptivas como la media y desviación estándar. La Figura 10 presenta tres series temporales desde 2005 hasta 2020. La línea negra denota datos medidos, mientras que la roja indica datos imputados.

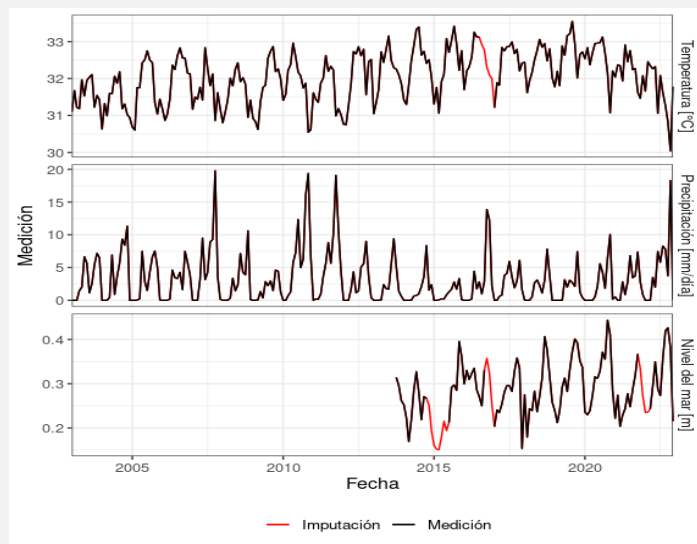
El panel superior exhibe la temperatura en grados Celsius, tendencia no lineal y variable sin un claro ascenso continuado, por lo tanto, la temperatura promedio mensual no es constante.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Además, existen fluctuaciones anuales vinculadas a ciclos estacionales. Esto podría indicar que, a pesar de cambios climáticos globales, esta región en particular ha presentado años de temperatura regulares de acuerdo con los registros históricos que concuerdan con las descripciones climáticas de la ciudad de Cartagena.

Figura 10.

Imputación de datos faltantes en las series de tiempo de las variables meteorológicas



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023) y DIMAR (2023).

El panel central muestra la media mensual de precipitación diaria en milímetros al día. Se distingue una tendencia descendente a lo largo del tiempo en los máximos de precipitación. La tendencia descendente en los máximos de precipitación sugiere que la región podría estar experimentando períodos más prolongados carentes de lluvia o que las temporadas de lluvias, aunque presentes, son menos intensas que en años anteriores, estas condiciones podrían estar condicionadas por el ciclo de variabilidad climática El Niño-La Niña del océano Pacífico

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

(ENOS). Los picos destacados aluden a lluvias intensas, marcando así períodos de lluvia y sequía.

Finalmente, el panel inferior muestra el nivel del mar en metros, destacando una clara tendencia ascendente, lo que sugiere un aumento en el nivel del mar. Este aumento podría estar vinculado a cambios climáticos globales. Debido a este ascenso las márgenes podrían ser objeto de socavación irregular por oleaje local, afectando infraestructura y ecosistemas costeros. A largo plazo, si esta tendencia persiste, podría ser necesario tomar medidas de adaptación, como la construcción de barreras costeras o la reubicación de comunidades vulnerables.

7.1.1.1 Análisis descriptivo de temperatura

Con el propósito de caracterizar la distribución de las temperaturas a lo largo del día en el área de estudio y cómo esta puede afectar la salud humana durante el desarrollo de las operaciones portuarias.

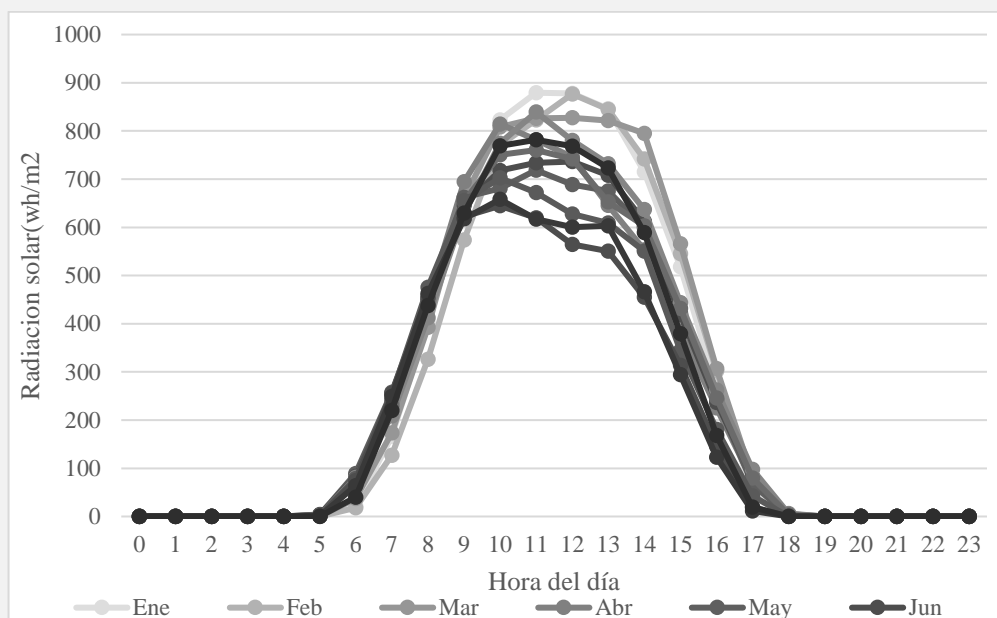
Los registros y la distribución de las temperaturas diarias indican que los valores más altos se han presentado entre las 11 a. m. y las 3 pm y los picos por fuera de este rango son menos habituales, lo que está relacionado con la intensidad de radiación solar diaria. Figura 11.

De esta manera, los valores base de este análisis son los registros de temperatura del aire diurna con referencia a la 1 pm, con un índice de representatividad del 99 %, por lo cual existen suficientes datos que permiten una descripción adecuada de las variaciones a lo largo del período contemplado. (IDEAM, 2017).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 11.

Promedios horarios de irradiación solar en la Estación Las Flores (IDEAM). (IDEAM UPME, 2017).



Fuente. Elaboración propia basada en IDEAM, 2023.

La temperatura promedio varía entre 30,6 °C a 33,4 °C en las últimas dos décadas, los años con mayor temperatura promedio han sido desde 2013 a 2021, con una leve disminución en el año 2022 indicando un periodo de La Niña.

A lo largo del año, las mayores temperaturas se presenta entre los meses de mayo a septiembre, a su vez, julio es el mes de mayor temperatura promedio entre 2003 a 2022.

Estos meses calurosos coinciden con la época de lluviosa menor de mayo a junio y la época seca menor definida entre julio y agosto. (IDEAM, 2023), (EPA Cartagena, 2019).

La Tabla 8 muestra la distribución de temperaturas promedio mensuales entre 2003 a 2022 en escala de colores con los valores mayores en rojo.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 8.

Valores promedio de temperatura 2003-2022

Año/Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.
2003	31,1	31,6	31,2	31,2	32,0	31,6	31,9	32,0	32,1	31,2	31,5	31,4	31,6
2004	30,6	31,4	31,0	31,6	31,6	32,1	31,9	32,2	31,2	31,3	31,0	30,9	31,5
2005	30,7	30,7	31,8	31,8	32,4	32,6	32,8	32,5	32,4	31,4	31,1	31,4	31,6
2006	31,2	30,8	31,0	31,4	32,4	32,3	32,6	32,8	32,6	32,6	32,1	32,1	31,9
2007	31,2	31,4	31,4	31,8	31,4	32,7	32,3	31,8	32,1	30,9	31,6	31,2	31,8
2008	30,8	31,1	31,4	32,0	31,8	32,3	32,4	31,9	32,0	31,9	31,0	31,4	31,7
2009	30,9	30,9	30,6	31,4	31,8	31,9	32,6	32,7	32,9	32,2	32,2	32,0	31,7
2010	31,4	31,5	32,2	32,4	33,0	32,6	32,2	32,1	31,7	31,9	30,6	30,6	31,8
2011	31,6	31,4	31,4	31,9	32,0	32,6	32,2	32,3	32,3	31,0	31,1	31,0	31,8
2012	30,8	30,7	31,3	31,9	32,7	32,7	32,9	32,6	32,8	31,6	32,4	32,5	31,9
2013	31,0	31,3	31,7	32,7	32,4	32,8	33,2	32,5	32,3	32,3	32,1	31,9	32,1
2014	31,4	31,3	31,8	32,4	32,9	33,4	33,4	32,6	32,8	32,4	32,5	32,0	32,3
2015	31,3	31,8	31,1	31,9	32,1	33,1	32,7	33,0	33,4	32,9	32,3	32,8	32,4
2016	31,7	32,2	32,3	32,5	33,3	33,1	33,1						32,4
2017	31,2	31,9	31,8	32,8	32,7	32,9	32,9	33,0	32,7	32,8	32,2	32,4	32,5
2018	32,4	31,8	31,9	32,2	32,5	32,8	33,1	32,8	33,0	32,5	32,8	32,0	32,5
2019	31,8	32,2	31,8	32,9	32,6	33,2	33,2	33,5	33,0	32,0	32,7	32,7	32,6
2020	32,5	32,9	32,4	32,7	32,9	32,9	33,0	33,1	32,7	32,1	31,0	32,2	32,6
2021	32,0	32,3	32,3	31,9	32,9	32,5	32,8	32,2	32,1	31,6	31,4	32,1	32,4
2022	31,7	32,4	32,3	32,2	32,3	31,1	32,1	31,6	31,3	30,8	30,1	31,8	31,9
Prom.	31,4	31,6	31,6	32,1	32,4	32,5	32,7	32,5	32,4	31,9	31,7	31,8	
Escala	30	30,3	30,6	30,9	31,2	31,5	31,8	32,1	32,4	32,7	33	33,3	

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

El valor máximo registrado fue de 40,4 °C registrado en junio de 2015, posiblemente asociado al fenómeno de variabilidad climática de oscilación del Sur – ENOS de El Niño.

En este sentido la región caribe sufre influencia en todo el sistema climático, cuya intensidad no es lineal, ampliamente variable, depende en gran medida de las anomalías de temperatura superficial del aire y subsuperficial marina además del área afectada. Las alteraciones del fenómeno ENOS son la causa de altas temperaturas durante periodos atípicos,

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

sequías y lluvias extremas, que alteran las condiciones atmosféricas en la región. (IDEAM, 2017).

El ciclo de variabilidad climática denominado "El Niño" y su fase opuesta "La Niña" tienen la mayor influencia en las condiciones meteorológicas en la franja tropical del océano Pacífico (ENOS), en la escala interanual, estas se pueden distribuir en tres condiciones principales. (IDEAM, 2017). La Figura 12 muestra la distribución de la interpretación de los años El Niño y La Niña (IDEAM, 2017).

- El Niño. Fase de calentamiento extremo, donde se produce el calentamiento relativo de las aguas del Océano Pacífico tropical central y oriental, debilitamiento de los vientos alisios que reducen de manera generalizada los volúmenes de lluvias, aumenta la evaporación y evapotranspiración, más significativamente en las regiones Caribe y Andina Colombiana.
- La Niña. Fase de enfriamiento, donde los vientos Alisios se intensifican con dirección E-O y producen lluvias abundantes en relación con los registros históricos para el mismo periodo del año en las regiones Andina, Caribe y Pacífica.
- Fase neutral. Las temperaturas del Pacífico tropical se mantienen dentro de los rangos históricos promedio por fuera de las fases anteriores, así como los patrones de viento, presión y circulación oceánica mantienen los valores, acordes con los registros históricos.

Figura 12.

Ocurrencia histórica de fenómenos El Niño y La Niña, intensidad y duración.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Periodo evento	Año 1												Año 2												Intensidad
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1982-1983																									Fuerte
1986-1987																									Moderado
1988-1989																									Fuerte
1991-1992																									Moderado
1997-1998																									Fuerte
1999-2000																									Moderado
2006																									Débil
2007-2008																									Fuerte
2010-2011																									Fuerte
2011-2012																									Débil
2014-2015																									Débil
2015-2016																									Moderado
2020-2021																									Moderado
2021-2022																									Moderado
2022-2023																									Moderado

Ocurrencia de fenómeno El Niño
 Ocurrencia de fenómeno La Niña

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM, 2017 y NOAA, (2023).

Las cambiantes condiciones atmosféricas y meteorológicas, en particular las relacionadas con el aumento de las temperaturas, la humedad relativa y los cambios en los regímenes de precipitaciones, pueden repercutir en el rendimiento y el entorno de trabajo de las personas en las operaciones portuarias, entre otras.

De esta manera, se considera importante que se tenga en cuenta la identificación histórica de la ocurrencia de los fenómenos El Niño-La Niña, que permita crear registros de acontecimientos y afectaciones tanto en la salud humana como en el sistema general portuario.

El rango de valores de temperatura promedio diurna que se registró entre los años 2003 a 2005 con temperaturas promedio anuales de 31,6 °C; en 2006 se presenta El Niño elevando la

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

temperatura a 31,9 C anual con valores máximos promedios de 32,8 °C y absolutos de 35,8 °C
ambos para el mes de septiembre.

Tabla 9.

Valores promedio mensual de temperatura máxima diaria. Periodo 2003-2022

Año/Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Máx.
2003	32,8	33,9	33,1	32,7	32,9	33,7	33,8	34,8	35,1	33,3	33,4	33,2	35,1
2004	33,4	34,2	32,9	33,6	33,0	33,5	33,8	35,6	33,2	33,2	33,2	32,2	35,6
2005	32,2	32,2	34,6	34,2	34,8	34,6	34,2	35,4	34,8	32,8	33,0	32,7	35,4
2006	34,0	32,0	34,2	33,5	34,4	35,1	34,4	34,9	34,5	35,4	34,4	33,2	35,4
2007	33,0	34,0	33,8	34,8	34,0	39,8	33,6	34,5	35,8	34,8	34,0	32,0	39,8
2008	32,0	33,4	33,6	34,4	34,2	34,2	34,8	34,6	34,2	33,1	33,1	32,6	34,8
2009	32,6	32,8	33,4	32,4	33,3	33,3	34,0	34,0	36,2	36,0	34,0	34,1	36,2
2010	33,9	34,1	34,4	34,8	35,0	35,0	34,6	33,8	33,1	35,0	32,3	33,2	35,0
2011	33,0	35,4	33,2	34,7	33,6	34,7	34,8	35,2	35,2	33,4	32,8	33,0	35,4
2012	33,0	32,5	32,4	34,4	36,0	34,1	34,6	33,8	35,2	34,6	35,0	35,0	36,0
2013	33,2	33,1	33,7	34,4	34,0	34,8	34,8	34,6	35,0	34,2	33,6	33,0	35,0
2014	33,9	32,8	33,8	34,6	34,4	34,8	37,4	35,1	35,1	35,6	34,3	34,2	37,4
2015	32,8	33,0	32,9	33,0	35,7	40,4	34,4	35,5	36,8	35,1	34,6	35,0	40,4
2016	33,4	34,0	34,8	33,8	35,1	35,3	35,0						35,3
2017	32,7	34,2	35,4	35,2	35,2	34,5	34,8	34,4	34,7	35,0	34,3	34,3	35,4
2018	34,6	34,6	34,8	34,3	36,1	34,9	36,0	35,4	35,8	34,4	34,7	33,2	36,1
2019	34,1	34,2	33,5	34,6	35,9	35,0	35,8	36,8	36,2	34,3	34,3	34,9	36,8
2020	34,4	34,5	34,2	34,4	34,7	34,8	34,9	36,1	35,5	35,0	34,7	33,8	36,1
2021	33,8	34,3	34,2	33,4	35,9	35,8	36,2	36,9	36,0	34,0	33,6	33,2	36,9
2022	33,4	33,9	34,2	34,3	34,3	33,0	34,4	33,7	34,2	34,4	33,4	33,0	34,4
Max.	34,6	35,4	35,4	35,2	36,1	40,4	37,4	36,9	36,8	36,0	35,0	35,0	
Escala	32,0	32,8	33,5	34,3	35,0	35,8	36,5	37,3	38,0	38,8	39,5	40,3	
	El Niño					La Niña							

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023) y NOAA, (2023).

Existe un periodo de relativa baja temperatura promedio anual entre los años 2007 a 2012 cuando se dieron condiciones de neutralidad del ENOS (IDEAM, 2012), mientras hay un

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

incremento relativo continuo desde 31,9 °C a 32,6 °C entre 2013 a 2021 y con un leve descenso a 31,9 °C en el promedio anual para 2022.

En este mismo periodo, los valores máximos mensuales absolutos recurrentes entre 34,4 a 37,4 °C entre los meses de abril y septiembre, con máximo absoluto el día 24 de junio de 2015, cuando se registró una temperatura de 40,4 °C y corresponde a un mes con fenómeno El Niño.

Tabla 9.

El análisis de la Tabla 10 revela patrones significativos en la distribución de frecuencias de temperatura durante el periodo de El Niño entre 2012 y 2022. Se observa un notable aumento en la ocurrencia de temperaturas más altas durante los años 2016-2017 y 2019-2020, indicando una asociación con este fenómeno climático.

Sin embargo, el año 2022 presenta un cambio notable, con un descenso relativo en la frecuencia de temperaturas elevadas, acompañado por un aumento en la frecuencia de rangos de temperaturas más bajas y aumento en las lluvias. Este cambio sugiere una variabilidad en las condiciones climáticas, divergiendo del patrón típicamente asociado con El Niño, por lo cual se considera un año en el cual se presenta La Niña. (NOAA, 2023).

La Tabla 9, por lo tanto, ofrece una visión detallada de las fluctuaciones en la temperatura a lo largo de estos años, proporcionando información valiosa sobre la dinámica climática en el contexto del fenómeno de El Niño-La Niña.

Tabla 10.

Porcentaje (%) de ocurrencia anual según rangos de temperatura. Periodo El Niño 2012-2022.

Temp.	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
24-25,5											0,3

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

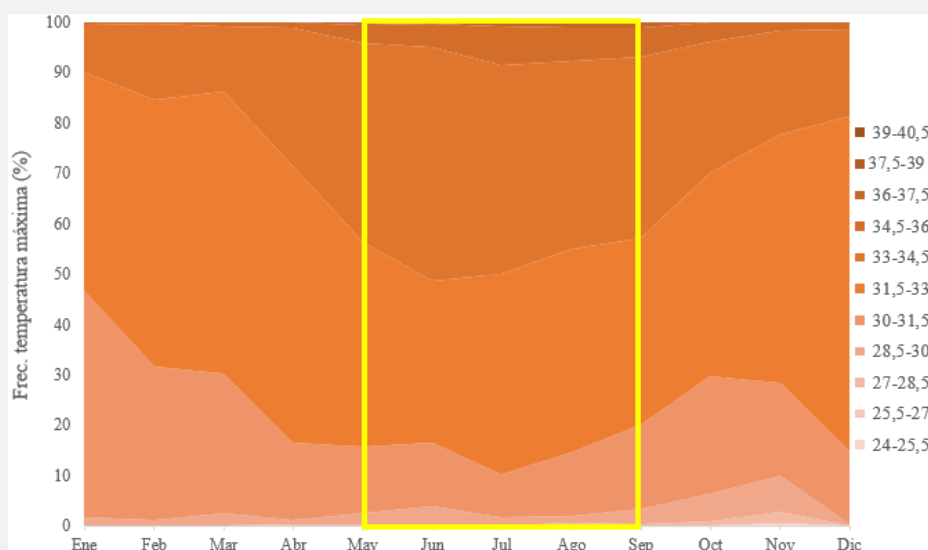
Temp.	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
25,5-27											0,3
27-28,5						0,3		0,8	0,6	0,8	1,4
28,5-30	2,2	2,5	1,6	1,7	0,5	3	2,5	1	3	3	6,4
30-31,5	29	23	19	21	14	19	15	14	15	21	32
31,5-33	43	48	49	47	48	39	49	44	41	51	48
33-34,5	24	25	27	27	34	35,4	29	35,4	36,3	20,2	13
34,5-36	1,6	1,9	3,3	3,0	4,3	3,8	3,8	5,2	4,7	3,6	
36-37,5	0,3		0,3	0,3			0,5	0,6	0,3	0,8	
37,5-39											
39-40,5				0,3							

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023) y NOAA, (2023).

La Figura 13 permite observar que entre los años 2012 a 2022 en los meses mayo a septiembre la temperatura máxima se incrementa, registrando mayores frecuencias en los rangos superiores a 36 °C alcanzando incluso el mayor valor histórico de 40 °C para el 24 de junio de 2015.

Figura 13

Frecuencia promedio de ocurrencia de temperaturas máximas mensuales. 2012 – 2022.



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

El índice de calor permite evaluar cuantitativamente la sensación térmica que experimenta el cuerpo humano al exponerse a condiciones determinadas de temperatura ambiente (T_a) y humedad relativa (HR).

Tiene en cuenta los efectos de la temperatura y de la humedad relativa aire en un momento en exteriores dado en la termorregulación y percepción subjetiva de calor. La medida obtiene valores en grados centígrados, pero no corresponde a una temperatura real sino una sensación, que valora la dificultad del organismo para su propia regulación térmica a través de la evaporación del sudor dada la saturación de humedad presente en el ambiente que lo impide o retrasa. (Soto, 2020).

La ecuación de índice de sensación térmica puede calcularse usando la relación matemática de Lans P. Rothfusz descrita por el Servicio Nacional meteorológico de Estados Unidos (NWS). Los rangos de calificación de estrés térmico por índice de calor se muestran en la Tabla 11. (Soto, 2020).

La Tabla 12 muestra la frecuencia en las que se presentan los diferentes rangos de índice de calor para Cartagena entre los años 2019 a 2022, revela que cerca del 68 % de los registros tienen una calificación de peligro en la calificación de estrés térmico, mientras solo el 1,5 % de las ocasiones han ocurrido condiciones de estrés térmico consideradas de peligro extremo.

Tabla 11

Calificación del estrés térmico de Índice de calor.

Clasificación	Índice de calor °C	Posibles efectos en salud
Normal	< 26	Condiciones ambientales sin efecto en la salud por índice de calor
Precaución	27-32	Posible fatiga debido a exposición prolongada o actividad física

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Precaución extrema	33-40	Posible riesgo de insolación, golpe de calor, calambres, por exposición o actividad física
Peligro	41-53	Alto riesgo de insolación, golpe de calor, calambres por exposición o actividad física
Peligro extremo	>54	Muy alto riesgo de golpe de calor e insolación inminente

Fuente. Elaboración propia a partir de (Soto, 2020).

Tabla 12

Porcentaje (%) de ocurrencia de índices de calor anual. Periodo 2019 – 2022.

Año	Índice de calor °C				
	Normal < 26	Precaución 27-32	Precaución extrema 33-40	Peligro 41-53	Peligro extremo >54
2019			24 %	75 %	1,39 %.
2020			22 %	77 %	1,51 %
2021		0,92 %	31 %	67 %	0,92 %
2022		1,50 %	30 %	67 %	1,50 %

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023) y Soto, (2020)

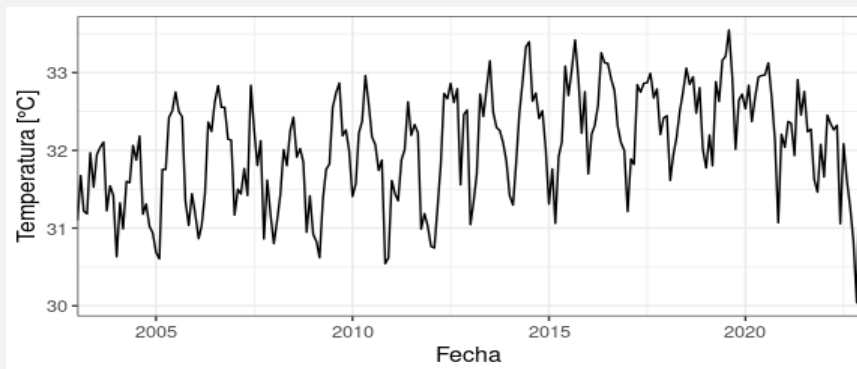
7.1.1.2 Modelo analítico de Temperatura

La Figura 14. muestra la serie de tiempo de temperatura en grados Celsius desde enero de 2003 hasta diciembre de 2022. Durante este periodo, la temperatura varía en un rango entre 30 y 33.5 °C. No se evidencia una tendencia de aumento o disminución en los 15 años, sin embargo, la donde la temperatura presenta un descenso marcado. También, se observan oscilaciones regulares; estas variaciones sugieren un comportamiento cíclico, posiblemente debido a cambios estacionales. Los máximos mensuales más altos de temperatura se registraron en 2019, 2015, y 2014, y los más bajos en 2022, 2010, y 2005.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 14.

Serie de tiempo de temperatura ambiente en grados Celsius



Fuente- Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

La Tabla 13 muestra los resultados de las pruebas de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilks) y estacionariedad (Prueba de Dickey-Fuller) para la serie de tiempo de temperatura. Los resultados de la prueba de normalidad sugieren que la serie de tiempo no es normalmente distribuida $p < 0,05$. Por otro lado, los resultados de la prueba de estacionariedad sugieren que la serie de tiempo es estacionaria $p < 0,05$. La estacionariedad de la serie de tiempo indica que la media y la varianza de la serie de tiempo son constantes a lo largo del tiempo. Este resultado contradictorio puede surgir dada la naturaleza no estacionaria de la serie de tiempo.

Tabla 13

Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de temperatura.

Prueba	p-valores
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0,00
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0,01

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

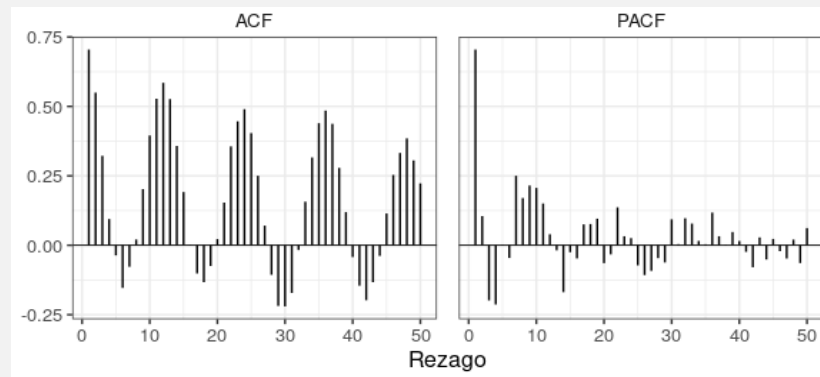
Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Para examinar la autocorrelación en la serie temporal, se calculan la función de autocorrelación y la autocorrelación parcial, Figura 15.

La serie muestra características autorregresivas y una correlación notable en rezagos de 12 meses. Esto indica que la temperatura de un mes está vinculada con la del mismo mes del año anterior, evidenciando una periodicidad anual.

Figura 15.

Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de temperatura.



Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Se ajusta un modelo ARIMA (1,1,0) a la serie, con el valor más debajo de AIC siendo de 366. El modelo matemático se representa como:

$$(1 + 0,2508B)\nabla x_t = w_t$$

Aquí, x_t es la serie de tiempo, w_t es la componente de ruido blanco y B es el operador de rezago. Teniendo en cuenta este modelo, se verifican las características distribucionales del ruido blanco con la prueba de independencia de los residuos de Ljung-Box. El resultado de la prueba confirma su independencia (p – valor $> 0,05$). Además, mediante la prueba de Jarque-Bera, se

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

evidencia que los residuos se distribuyen de acuerdo a la distribución normal ($p - \text{valor} > 0,05$).

Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14

Resultados de las pruebas de independencia y normalidad para los residuos del modelo ajustado a la serie de tiempo de temperatura.

Prueba	p-valores
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0,77
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0,39

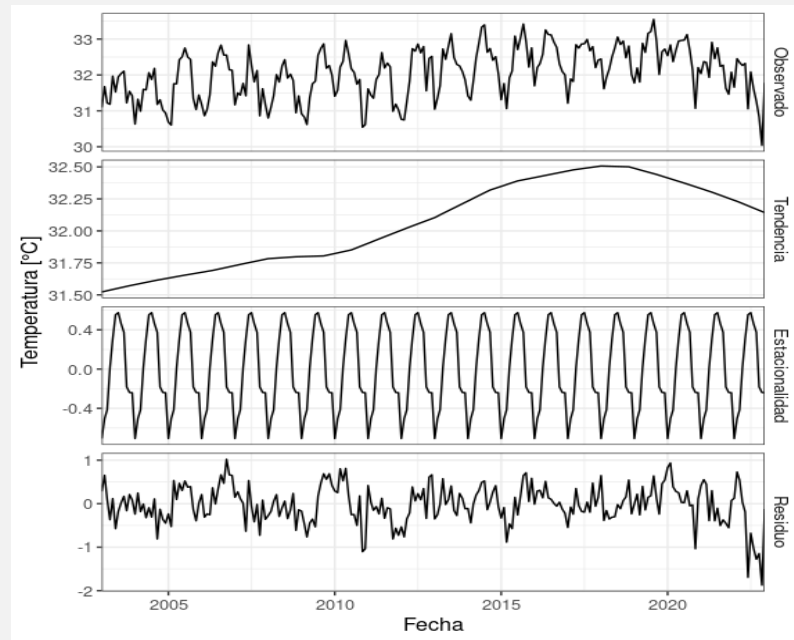
Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

De acuerdo con lo anterior, es válido descomponer la serie temporal de temperatura en componentes de tendencia, estacionalidad y ruido blanco, representados como $X_t = T_t + S_t + \epsilon_t$. Para ello, se utiliza el método de descomposición STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess, por sus siglas en inglés) (Cleveland et al, 1990). Figura 16.

Se observa una tendencia ligeramente ascendente, indicando que la temperatura ha ido aumentando gradualmente a lo largo de los años. La componente estacional muestra un patrón claro y repetitivo, relacionado con las estaciones del año (periodo 12 meses). Finalmente, el ruido blanco muestra una variación aleatoria alrededor de la tendencia y la estacionalidad.

Figura 16.

Descomposición STL de la serie de tiempo de temperatura



Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Aunque se visualiza un aumento leve en la tendencia de la temperatura en los primeros 15 años y un posterior descenso en los últimos 5 años, se efectúa un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si este incremento y descenso es estadísticamente significativo. Para ello, se realiza una prueba de hipótesis para determinar si la media de la temperatura es igual en todos los años.

La hipótesis nula es que la media es igual en todos los años ($H_0: \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$), mientras que la hipótesis alternativa indica que la media es diferente en al menos un año ($H_0: \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$). El resultado de la prueba indica que la media de la temperatura es diferente en al menos un año (p – valor < 0,05). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la temperatura ha aumentado significativamente a lo largo de los años. Figura 17.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 15. Las diferencias en la distribución de las mediciones por años se pueden visualizar en la Figura 22.

Tabla 15

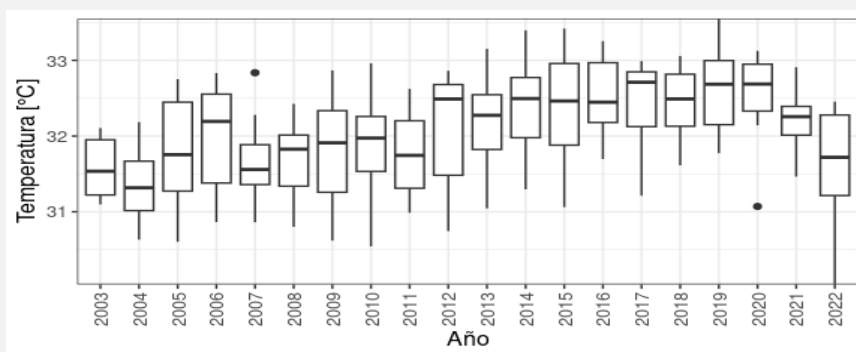
Resultados de la prueba de hipótesis para determinar si la media de la temperatura es igual en todos los años.

Término	Grado de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Año	19	33,53	1,76	4,70	0,00
Residuos	220	82,59	0,38	-	-

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Figura 17.

Diagrama de cajas de la temperatura por año.



Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

La prueba de Student-Newman-Keuls (SNK) se emplea para encontrar diferencias significativas entre las medias de temperatura anuales. Clasifica los años en grupos basados en la similitud de sus temperaturas medias, como se ilustra en la Tabla 16. El grupo ‘a’ corresponde a los años con las temperaturas más altas, mientras que el grupo ‘e’ representa las más bajas. Por su parte, el grupo ‘abcde’ denota temperaturas intermedias.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La distribución numérica de los años en estos grupos revela que la mayoría pertenece al grupo ‘abcde’, de temperaturas intermedias, sugiriendo una relativa estabilidad térmica durante el periodo analizado.

Tabla 16

Grupos de años con medias similares.

Año	Temperatura media [°C]	Grupo
2003	31,6	de
2004	31,4	e
2005	31,8	bcde
2006	32,0	abcde
2007	31,7	cde
2008	31,7	cde
2009	31,8	abcde
2010	31,8	abcde
2011	31,7	bcde
2012	32,1	abcde
2013	32,2	abcde
2014	32,4	abcd
2015	32,4	abcd
2016	32,5	ab
2017	32,4	abc
2018	32,5	abc
2019	32,6	a
2020	32,5	ab
2021	32,2	abcde
2022	31,6	cde

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Se aplicó la fórmula de tasa de variación porcentual (TV) para analizar el cambio anual en la temperatura. La ecuación utilizada es la siguiente:

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

$$TV = \left(\frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

Las tasas de variación resultantes se aproximan al 1 %, lo que indica un cambio mínimo en la temperatura durante el periodo estudiado. El cambio más significativo en la tasa de variación se observa para el periodo 2021 - 2022, en este caso, la temperatura promedio aumentó en un - 1,8 % respecto al año anterior. Tabla 17.

Tabla 17.

Tasas de variación anual para la temperatura

Años comparativos	Tasa de variación [%]
2003 - 2004	-0,6
2004 - 2005	1,2
2005 - 2006	0,7
2006 - 2007	-1,0
2007 - 2008	0,0
2008 - 2009	0,5
2009 - 2010	0,1
2010 - 2011	-0,3
2011 - 2012	1,0
2012 - 2013	0,4
2013 - 2014	0,7
2014 - 2015	-0,2
2015 - 2016	0,5
2016 - 2017	-0,3
2017 - 2018	0,1
2018 - 2019	0,5
2019 - 2020	-0,3
2020 - 2021	-1,0
2021 - 2022	-1,8

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

7.1.1.3 Análisis descriptivo de precipitación

El análisis de los datos históricos de precipitaciones en el ámbito local del Puerto de Cartagena permite caracterizar el impacto de la lluvia en el sistema portuario de la terminal.

Un análisis estadístico descriptivo permite identificar fechas, eventos y magnitudes de las precipitaciones que han afectado al puerto, así como evidenciar la evolución de las medidas de adecuación, reparación o reforzamiento de la infraestructura, operaciones y el almacenamiento de la carga.

Una interpretación detallada facilita el establecimiento de umbrales, la preparación de protocolos de sucesos basados en escenarios de datos históricos para planificar medidas de control y adaptación, así como la toma de decisiones.

Los datos de precipitación tienen un índice de representatividad de los datos muestra un valor de un 99 %, permitiendo hacer una descripción cercana a la realidad a la luz de los datos. (IDEAM, 2017).

La Tabla 18 muestra los días con registros de lluvia entre 2003 a 2022, en la cual se revela que el mayor número corresponde a los años 2010 y 2011 con 158 y 144 días con lluvia correspondientemente, seguidos por los años 2022, 2003 y 2005 con 120, 119 y 111 registros respectivamente.

Por otro lado, los años 2004, 2009, 2015 y 2016 registran los menores días de lluvia anual. También que en los meses junio a noviembre existe el mayor número de días con lluvia en las últimas dos décadas, con la especial atención en octubre de 2003 cuando hubo 20 días de lluvia.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

La información anterior permite concluir que los meses de diciembre a mayo son aquellos en los que hay una menor probabilidad de lluvias. Durante este período, es propicio planificar reparaciones, ajustes u obras de adaptación de infraestructura que requieran días sin precipitaciones. Asimismo, se podría anticipar que las interrupciones en el transporte de alimentos a granel desde los silos hasta las motonaves serían menos probables durante estos meses.

El volumen de lluvia por meses en diferentes años se resume en la Tabla 19 en el periodo comprendido entre 2003 a 2022. Revela que los años donde de mayor pluviosidad fueron 2010 y 2011 con 2292 y 2017 ml/año respectivamente, seguido por 1527 ml/año de 2022. Los años con menor pluviosidad registrada han sido 2015 con 322,8 ml/año, seguido por 2014 con 496 ml/año y 209 con 613 ml/año.

Tabla 18.

Número de días con lluvia. Periodo 2003-2023.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Acumulado
2003				7	8	18	16	13	15	20	15	7	119
2004				5	13	6	17	13	16	16	13		99
2005			3	4	15	16	10	11	16	16	18	2	111
2006				2	10	17	16	12	15	21	13	3	109
2007		1		7	16	15	15	19	14	21	11	1	120
2008		1		2	11	12	16	20	15	15	14	1	107
2009			2	2	5	13	9	12	9	12	11	3	78
2010			9	8	9	17	20	18	19	21	28	9	158
2011		2	3	10	10	16	18	11	17	24	21	12	144
2012				3	10	11	9	19	14	20	9	2	97
2013				2	14	12	12	19	14	18	12	2	105
2014				1	3	11	5	14	13	13	11	6	77
2015			1	4	5	7	9	8	10	7	7	4	62
2016				6	5	6	10	11	19	20	20	8	105
2017			5	3	11	18	13	14	15	15	16	3	113
2018	1			6	15	15	11	7	16	17	9		97

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Acumulado
2019	1			1	16	10	8	8	12	24	6	2	88
2020					7	14	17	15	17	10	17	2	99
2021	1			2	7	13	10	17	16	20	13	1	100
2022		1		9	10	26	14	19	19	18	19	1	136

Escala	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	El Niño					La Niña					

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023) y NOAA, (2023).

La distribución de las precipitaciones a lo largo del año puede dividirse en cuatro periodos según los registros históricos de Cartagena de Indias. (EPA Cartagena, 2019), (IDEAM, 2023).

1. Diciembre-abril. Los vientos alisios del NE son de velocidad moderada, mientras que las precipitaciones son escasas. Época seca mayor. En este periodo se presenta el 9 % de los días con lluvia anual y el 21 % del volumen de lluvia al año entre 2003 a 2022.
2. mayo-junio. Los vientos alisios suelen ser débiles y van acompañados de algunas precipitaciones irregulares y escasas. Época lluviosa menor. En este periodo se presenta el 23 % de los días con lluvia anual y el 20 % del volumen de lluvia al año entre 2003 a 2022.
3. Julio-agosto. Se producen algunas precipitaciones con frecuencia e intensidad irregular, mientras que la velocidad de los vientos del N-NE tiende a aumentar en julio. Época seca menor. En este periodo se presenta el 26 % de los días con lluvia anual y el 20 % del volumen de lluvia al año entre 2003 a 2022.
4. Septiembre-noviembre. Es la estación lluviosa mayor, durante la cual los episodios de precipitaciones se intensifican y prolongan, y la velocidad de los vientos disminuye. Época de lluvia mayor. En este periodo se presenta el 43 % de los días con lluvia anual y el 40 % del volumen de lluvia al año entre 2003 a 2022.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Esta descripción de épocas de lluvias en el área de influencia del Puerto de Cartagena se encuentra respaldada por los resultados históricos de la Tabla 19.

Tabla 19

Precipitación acumulada mensual (mm/mes) entre 2003-2022

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Acumulado
2003	0	0	0	44	53	192	176	33	33	169	214	129	1043,9
2004	0	0	0	13	196	27	111	109	278	260	163	0	1156,6
2005	0	0	1	2	223	80	45	133	196	176	139	1	995
2006	0	0	0	6	133	101	41	133	48	232	173	120	987
2007	0	0	0	95	292	81	79	239	274	556	97	5	1717,7
2008	0	0	0	11	72	42	64	142	100	86	278	3	796,8
2009	0	0	1	40	11	85	58	92	43	143	134	6	613
2010	0	0	19	34	166	217	360	154	151	498	486	208	2292,8
2011	0	6	5	29	88	167	209	175	305	591	303	140	2016,8
2012	0	0	0	6	118	34	45	111	160	276	107	11	867
2013	0	0	0	2	72	42	53	170	185	142	39	19	723,2
2014	0	0	0	0	21	20	31	66	109	155	21	74	495,8
2015	0	0	0	7	3	25	23	26	84	52	100	3	322,8
2016	0	0	0	7	138	52	87	30	86	188	294	67	948,4
2017	0	0	19	24	118	123	185	103	50	51	83	49	804,3
2018	1	0	0	16	66	91	67	34	92	243	111	0	721,5
2019	0	0	0	0	92	59	96	63	63	215	24	2	612,1
2020	0	0	0	0	16	34	128	124	51	82	225	5	665,3
2021	16	0	0	85	23	84	179	94	71	227	74	27	879,1
2022	0	0	0	103	62	222	180	84	208	116	549	3	1526,5

Escala	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
--------	---	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

El Niño La Niña

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023) y NOAA, (2023).

La Tabla 20 muestra la clasificación de intensidad de lluvias medida en mm/día entre 2003-2022, que va desde entre lloviznas a lluvia torrencial extrema.

El comportamiento de la lluvia a lo largo del año obedece no sólo a los periodos estacionarios de precipitación, también son notables los efectos en la precipitación del fenómeno El Niño-

Oscilación Sur (ENOS), de manera que tanto la frecuencia de lluvias como su intensidad son

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

mayores los años donde está presente el fenómeno de La Niña, de manera que puede considerarse que las condiciones más amenazantes para el sector portuario de Cartagena se dan más allá de eventos climáticos extremos como lo son las tormentas tropicales.

La Tabla 20 muestra la diferencia en frecuencias promedio de días de lluvia en los diferentes rangos de intensidad de lluvia en condiciones de El Niño, La Niña y Fase Neutral.

Tabla 20

Frecuencia de ocurrencia de los días de lluvia en diferentes intensidades entre 2003-2022.

Intensidad mm/día	Llovizna	Débil	Moderada	Fuerte	Fuerte	Torrencial	Torrencial extrema
Año	0,1-5	5-10	10-25	25-50	50-100	100-150	150-200
2003	69 %	5 %	18 %	4 %	3 %		1 %
2004	54 %	13 %	18 %	9 %	5 %	1 %	
2005	62 %	11 %	16 %	7 %	4 %		
2006	69 %	9 %	12 %	6 %	2 %	2 %	
2007	62 %	13 %	8 %	8 %	4 %	3 %	2 %
2008	64 %	17 %	13 %	5 %	2 %		
2009	71 %	10 %	8 %	9 %	3 %		
2010	57 %	9 %	13 %	14 %	6 %	1 %	1 %
2011	58 %	10 %	14 %	12 %	6 %	1 %	
2012	64 %	13 %	11 %	7 %	4 %		
2013	68 %	13 %	10 %	10 %			
2014	68 %	13 %	14 %	4 %	1 %		
2015	71 %	13 %	11 %	3 %	2 %		
2016	62 %	12 %	14 %	9 %	3 %		
2017	65 %	12 %	15 %	7 %	1 %		
2018	64 %	11 %	15 %	8 %	1 %		
2019	63 %	13 %	18 %	6 %	1 %		
2020	72 %	11 %	10 %	6 %	1 %		
2021	60 %	14 %	17 %	6 %	3 %		
2022	62 %	13 %	11 %	10 %	3 %	1 %	

 El Niño La Niña

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

7.1.1.4 Modelo analítico de precipitación

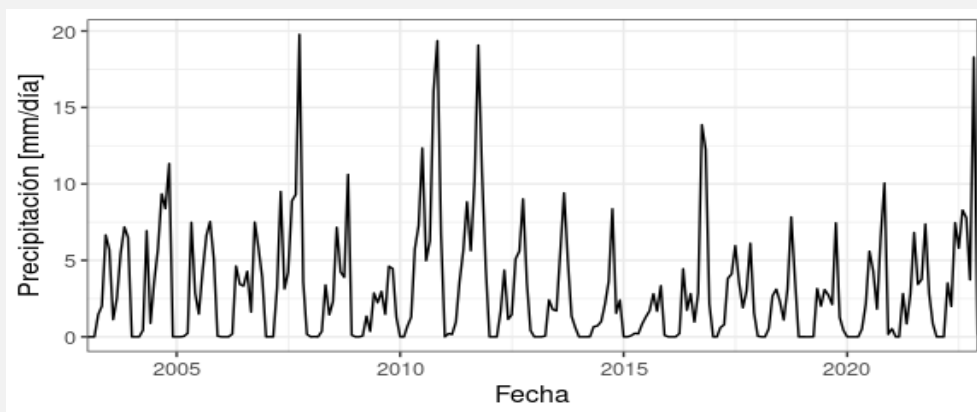
La Figura 18. presenta la evolución de la precipitación diaria promedio en milímetros desde enero de 2003 hasta diciembre de 2022. Durante este intervalo, la precipitación oscila entre 0 y 19,8 mm día⁻¹. Es notable la variabilidad en la precipitación, con picos pronunciados que señalan días de lluvias intensas. Esta variabilidad es distinta según los años, indicando estaciones o años de diferente intensidad pluviométrica.

El periodo 2005 - 2011 destaca por varios picos de fuerte precipitación, sugiriendo eventos o estaciones lluviosas más activas. Los años más lluviosos son 2007, 2010, y 2011. Posteriormente, desde 2015, la precipitación muestra menor intensidad y variabilidad, posiblemente indicando un periodo de más sequía.

Estas tendencias pueden relacionarse con fenómenos como El Niño o La Niña, que influyen en los patrones de lluvia a nivel global. Tabla 20.

Figura 18.

Serie de tiempo de precipitación.



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

La Tabla 21 presenta los análisis de normalidad (mediante la Prueba de Shapiro-Wilks) y estacionariedad (usando la Prueba de Dickey-Fuller) para la serie temporal de temperatura. La serie no sigue una distribución normal (p – valor $< 0,05$), pero se identifica como estacionaria (p – valor $< 0,05$), lo que significa que su media y varianza se mantienen estables en el tiempo. Esta aparente incongruencia puede deberse a características intrínsecas no estacionarias de la serie.

Tabla 21.

Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de precipitación

Prueba	p-valores
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0,00
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0,01

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

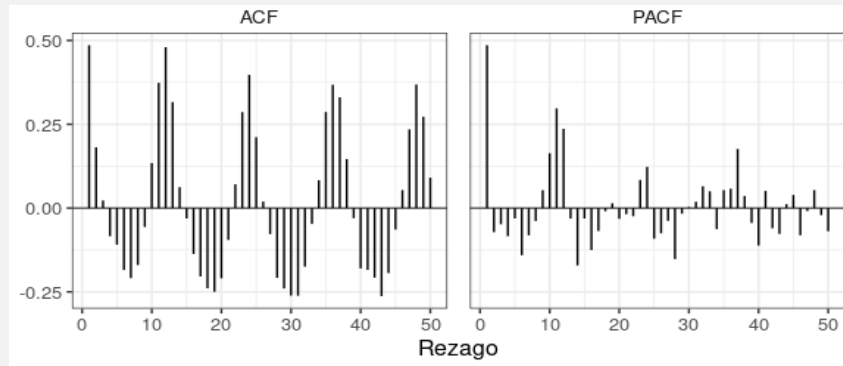
La Figura 19. presenta dos gráficos que presentan la Función de Autocorrelación (ACF) y la función de Autocorrelación Parcial (PACF) de la serie de tiempo de precipitación. En la ACF,

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

varios rezagos iniciales presentan correlaciones significativas que disminuyen drásticamente con el tiempo, indicando un comportamiento no estacionario.

Figura 19.

Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de precipitación.



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

Se ajusta un modelo ARIMA (1,0,0) a la serie, con el valor más bajo de AIC siendo de 1261. El modelo matemático se representa como:

$$(1 - 0,4866B)x_t = w_t$$

En este contexto, x_t representa la serie temporal, w_t es el componente de ruido aleatorio y B es el operador de rezago. El modelo obtenido indica que la serie de precipitación es no estacionaria, por lo tanto, el modelo ARIMA no se adecua para representar la serie de precipitación y en consecuencia es necesario de modelos más complejos. Con base en este modelo, se analizan las características del ruido aleatorio mediante la prueba de Ljung-Box para comprobar la independencia de los residuos. La prueba valida esta independencia (p – valor > 0,05). Adicionalmente, a través de la prueba de Jarque-Bera, se determina que los residuos no

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

siguen una distribución normal (p – valor $< 0,05$). Los detalles de estas pruebas se encuentran en la Tabla 22.

Tabla 22.

Resultados de las pruebas de independencia y normalidad de los residuos del modelo ARIMA (2,0,1) ajustado a la serie de tiempo de precipitación.

Prueba	p-valores
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0,53
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0,00

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

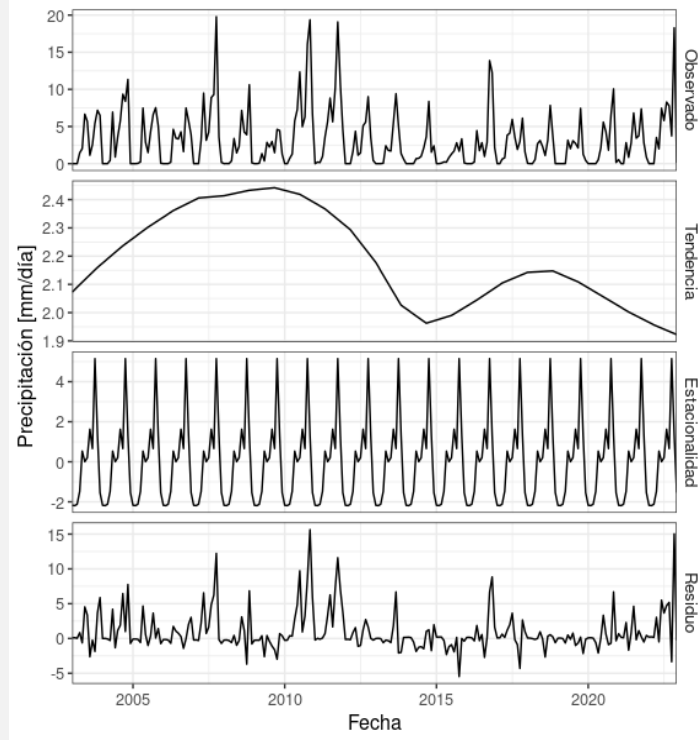
La Figura 20. muestra la descomposición STL de precipitaciones. La tendencia refleja una alta precipitación media desde 2005 a 2010, con un posterior descenso hasta el 2015 debido a variaciones climáticas o cambios regionales en patrones de lluvia. Para el periodo de tiempo del 2015 hasta el 2018, se observa un incremento en la precipitación con un pico en el 2019 y un posterior descenso hasta el 2022, un comportamiento similar al periodo del 2005 a 2010 pero menos marcado. Se detecta el comportamiento estacional de periodicidad anual.

Por último, las variaciones residuales, no asociadas a la tendencia ni estacionalidad, podrían ser anomalías causadas por eventos meteorológicos específicos o factores locales. La estacionalidad sugiere una región con estaciones de lluvias y sequías marcadas.

Figura 20.

Descomposición STL de la serie de tiempo de precipitación.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

Para verificar la significancia estadística de estas variaciones, se aplica un análisis de varianza (ANOVA). La prueba de hipótesis evalúa si la media de precipitación es constante a lo largo de los años. La hipótesis nula sostiene que la media no varía por año ("H₀: $\mu_{\text{año}_1} = \dots = \mu_{\text{año}_n}$ "), y la alternativa postula que al menos en un año, la media es distinta ("H₁: $\mu_{\text{año}_1} \neq \dots \neq \mu_{\text{año}_n}$ ").

Dado que el p-"valor" < 0.05, se infiere que la media de precipitación difiere en al menos un año. Así, se descarta la hipótesis nula y se infiere un cambio significativo en la precipitación media con el tiempo. Tabla 23. Las variaciones anuales se ilustran en la Figura 21.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 23.

Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de la serie de tiempo de precipitación.

Término	Grado de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Año	19	484,06	25,48	1,90	0,02
Residuos	220	2,956,79	13,44	-	-

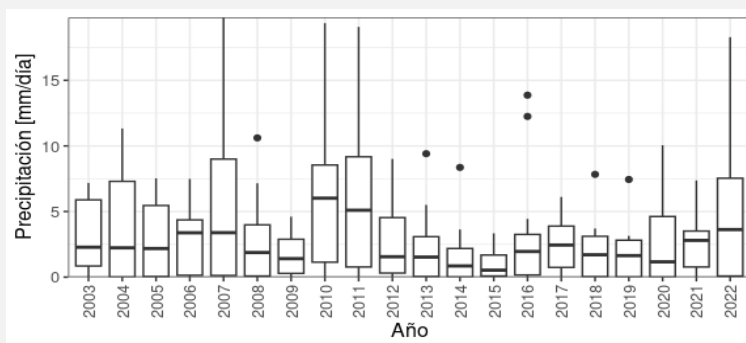
Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

Se utiliza la prueba de Student-Newman-Keuls (SNK) para analizar las variaciones significativas entre las medias anuales de precipitación. Esta prueba segmenta los años en 3 categorías según la proximidad de sus medias. Los detalles de estas categorías se exhiben en la Tabla 24.

El conjunto ab, que comprende los años 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, y 2022 presenta los valores de precipitación medio en el periodo de tiempo. El grupo relacionado con el año 2010 presenta la media de precipitación más alta. Por otro lado, el grupo b se encuentra relacionado con los promedios de precipitación más bajos del periodo de tiempo analizado.

Figura 21.

Diagramas de cajas de la precipitación por año



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 24.

Grupos de años con medias similares.

Año	Precipitación media [mm/día]	Grupo
2003	3,2	ab
2004	3,9	ab
2005	3,0	ab
2006	2,9	ab
2007	5,1	ab
2008	2,8	ab
2009	1,8	ab
2010	6,7	a
2011	5,8	ab
2012	2,7	ab
2013	2,3	ab
2014	1,7	ab
2015	1,0	b
2016	3,4	ab
2017	2,6	ab
2018	2,0	ab
2019	1,9	ab
2020	2,6	ab
2021	2,7	ab
2022	4,7	ab

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023)

Se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual (*TV*) para evaluar las fluctuaciones anuales en la temperatura. La fórmula aplicada es:

$$TV = \left(\frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 \text{ [%]}$$

La Tabla 25 muestra cambios anuales porcentuales en la precipitación diaria media desde 2003 hasta 2023. Los datos revelan fluctuaciones notables en la precipitación. Se observan

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

aumentos significativos, como el 78,5% en 2006-2007 y el 273,2 % en 2009-2010, así como descensos pronunciados, como el -45,7 % en 2007-2008, y el -82,3 % en 2022-2023. También hay años con cambios mínimos, como el -3,0 % en 2005-2006 y el 3,0 % en 2020-2021. En general, la tabla señala una variabilidad alta en la precipitación anual.

Tabla 25.

Tasa de variación anual para la precipitación

Años comparativos	Tasa de variación [%]
2003 - 2004	20,8
2004 - 2005	-23,5
2005 - 2006	-3,0
2006 - 2007	78,5
2007 - 2008	-45,7
2008 - 2009	-35,5
2009 - 2010	273,2
2010 - 2011	-13,8
2011 - 2012	-53,6
2012 - 2013	-13,4
2013 - 2014	-26,9
2014 - 2015	-40,1
2015 - 2016	237,6
2016 - 2017	-24,0
2017 - 2018	-22,2
2018 - 2019	-8,9
2019 - 2020	39,8
2020 - 2021	3,0
2021 - 2022	77,9

Fuente. Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

7.1.1.5 Análisis descriptivo de velocidad del viento

Los sistemas de circulación atmosférica traducen la interacción de temperatura y presión a través de los flujos de aire que generan los vientos, esta dinámica está influenciada por la morfología local, las unidades físicas tierra-mar, vegetación, entre otros.

Los vientos locales térmicos son el resultado de las diferencias de temperaturas entre el aire en tierra o mar en un área costera, y la respuesta al gradiente térmico atmosférico que determina la velocidad, profundidad y el área de desarrollo del flujo de viento.

Por otro lado, los flujos intensos de viento generados por eventos meteorológicos extremos en la región caribe ocurren periódicamente entre junio a noviembre, los cuales pueden desatar velocidades de viento entre 63 a 117 km/h en las fases de tormenta tropical y superiores si se alcanzan grados de huracán. (IDEAM, UPME, 2017).

La escala Beaufort resume las velocidades, la calificación y los efectos esperados como caracterización del impacto de los eventos. Tabla 26.

Los datos de velocidad del viento tienen un índice de representatividad de datos del 78 % respecto al periodo analizado entre 2003 a 2020. El registro de las velocidades máximas diarias en la ciudad de Cartagena muestra que el de las velocidades entre 1-62 km/h representan una frecuencia del 62 % de los resultados entre 2003 a 2020. Es decir, que un 38 % de los registros en ese periodo pueden asociarse con eventos que se catalogan como parte de tormentas tropicales fuertes y causa potencial de afectaciones en las zonas afectadas. Tabla 27. (IDEAM, UPME, 2017).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

El territorio colombiano está ubicado al sur de la trayectoria que sigue buena parte de ciclones tropicales del mar caribe, aunque hay escasos registros de contacto directo con su trayectoria de afectación directa. (IDEAM, UPME, 2017).

Tabla 26.

Escala de Beaufort.

Escala	Calificación	Vel (km/h)	Descripción
0	Calma	< 1	Hojas de árboles sin movimiento, mar calmado
1	Brisa débil	1-5	Veleta sin movimiento, oleaje suave.
2	Brisa muy débil	6-11	Veleta en movimiento, pequeñas olas
3	Brisa débil	12-19	Banderas pequeñas extendidas, oleaje largo sin crestas
4	Brisa moderada	20-28	Banderas extendidas, suave oleaje con crestas
5	Brisa fresca	29-38	Banderas extendidas con sacudidas, oleaje moderado con crestas
6	Viento fresco	39-49	Banderas con sacudidas violentas, oleaje largo crestas frecuentes
7	Viento fuerte	50-61	Oleaje largo ("mar picado")
8	Viento duro	62-74	Mar con fuerte oleaje y espuma sobre la superficie
9	Viento muy duro	75-88	Tejado se desprende de los techos, grandes olas
10	Temporal	89-102	Daño a edificaciones, mar muy agitado
11	Borrasca	103-117	Extenso daño en edificaciones, olas grandes
12	Huracán	>118	Daño extensivo y severo

Fuente. Elaboración propia a partir de Referencia Altas de viento de Colombia. 2017.

Tabla 27.

Frecuencia de intensidad de rangos de velocidad máxima del viento diaria. 2003-2020

Año	Velocidad del viento (km/h)											
	1 1-5	2 6-11	3 12-19	4 20-28	5 29-38	6 39-49	7 50-61	8 62-74	9 75-88	10 89-102	11 103-117	12 >118
2003	10 %	11 %	0,3 %	0,6 %	4,3 %	13 %	22 %	17 %	15 %	2,6 %	1,4 %	2,6 %
2004	8 %	13 %	0,3 %	1,1 %	10 %	16 %	13 %	18 %	13 %	6,8 %	1,4 %	0,8 %
2005	7 %	8 %	0,5 %	2,2 %	13 %	18 %	18 %	15 %	10 %	4,7 %	1,9 %	0,8 %
2006	6 %	10 %	0,5 %	0,3 %	9 %	15 %	18 %	19 %	12 %	6,3 %	2,7 %	1,6 %
2007	10 %	10 %	0,3 %	1,4 %	10 %	17 %	18 %	17 %	9,3 %	5,2 %	0,5 %	1,4 %
2008	4 %	10 %	0,5 %	0,3 %	3,3 %	12 %	17 %	25 %	19 %	6,0 %	2,2 %	1,1 %
2009	7 %	13 %	0,8 %	0,3 %	6 %	18 %	18 %	17 %	12 %	4,4 %	2,5 %	1,4 %
2010	7 %	11 %	0,0 %	1,2 %	5,5 %	20 %	16 %	23 %	11 %	4,6 %	1,7 %	0,3 %
2011	4 %	6 %	2,3 %	2,3 %	9 %	25 %	23 %	19 %	5,9 %	2,3 %	1,0 %	0,3 %

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Año	Velocidad del viento (km/h)											
	1 1-5	2 6-11	3 12-19	4 20-28	5 29-38	6 39-49	7 50-61	8 62-74	9 75-88	10 89-102	11 103-117	12 >118
2012	12 %	10 %	1,9 %	0,5 %	8 %	18 %	22 %	16 %	7,5 %	1,4 %	0,5 %	0,9 %
2013	10 %	10 %	0,0 %	1,3 %	11 %	14 %	14 %	19 %	14 %	4,4 %	1,3 %	0,6 %
2014	6 %	10 %	0,4 %	0,0 %	0,9 %	9,0 %	18 %	26 %	19 %	7,3 %	1,3 %	1,7 %
2015	4 %	20 %	0,6 %	0,3 %	2,3 %	7,2 %	11 %	12 %	16 %	15 %	9 %	2,3 %
2016	7 %	8 %	1,3 %	0,0 %	5,5 %	15 %	18 %	16 %	10 %	9 %	6 %	5,5 %
2017	6 %	13 %	1,1 %	0,4 %	9,0 %	19 %	12 %	17 %	10 %	9 %	2,6 %	1,9 %
2018												
2019	3,8 %	1,5 %	0,3 %	4,1 %	39 %	30 %	18 %	3,8 %	0,3 %	0,0 %	0,3 %	0,0 %
2020	6 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	16 %	29 %	39 %	10 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Escala (%)	0	5	10	15	25	30	40					

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

7.1.2 Análisis estadístico de variables mareográficas

7.1.2.1 Análisis descriptivo del nivel medio del mar (NMM)

El nivel medio del mar (NMM) presenta constantes variaciones a lo largo del tiempo, en los últimos años ha experimentado variaciones conforme disminuyen las masas de aguas sólidas en los continentes y principalmente de acuerdo con la variación de la temperatura de las aguas marinas superficiales.

El NMM es el nivel medio que se basa en las alturas de la superficie del agua durante las 24 horas a lo largo de un periodo no menor a un año, entre una posición vertical de referencia y nivel de la superficie del mar, esta magnitud permite establecer un valor que se considera representa el valor promedio de todas variables que provocan la fluctuación por variaciones periódicas y predecibles como las mareas, así como las provocadas por acción del viento y la presión atmosférica, entre otros factores. Figura 22.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

De esta manera, con base en los datos disponibles de la Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (REdMpomm) del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (CECOLDO) registrados en la Estación mareográfica automática CP05CIOH10 del Centro de investigaciones oceanográficas e hidrológicas (CIOH) bajo jurisdicción de la Dirección General Marítima (Dimar) localizada en la Isla Manzanillo a una distancia de 1 km desde el Puerto Compas Cartagena, permiten obtener que la variación de los niveles máximos y mínimos del NMM entre 2013 a 2022 ha sido entre -0,07 m como valor mínimo promedio diario hasta 0,45 m como valor máximo respecto al nivel de referencia de la estación referida. (DIMAR, 2023).

Estos datos presentan un índice de representatividad de los datos del 99 % en el periodo contemplado entre 2013 a 2022, donde se muestran de las tendencias de variación local del nivel del mar con referencia directa a la zona de influencia del área de estudio en el periodo contemplado. (DIMAR, 2023).

De acuerdo con los resultados de los análisis de datos mareográficos en la ciudad de Cartagena, la marea tiene clasificación mixta (semidiurna -diurna), principalmente diurna. (Molares Babra, 2004).

Las variaciones de los niveles NMM máximos y mínimos muestran un comportamiento cíclico a lo largo del año, con valores mínimos entre febrero a abril y máximos entre agosto a octubre aproximadamente, a lo largo del cual muestra una leve tendencia de ascenso en el periodo observado de 20 años aproximadamente.

Figura 22.

Amplitud de las mareas.



Fuente. Nivel del mar y régimen de marea en las estaciones mareográficas de Colombia IDEAM.

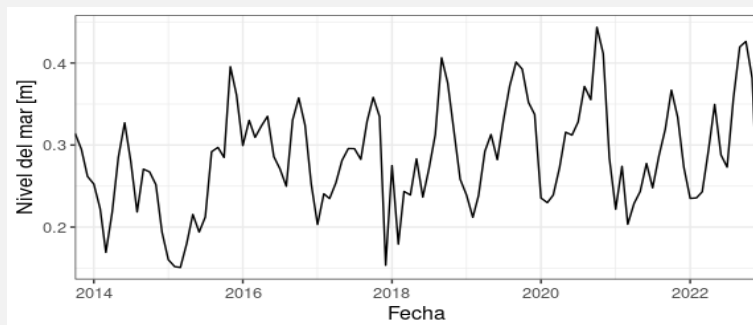
7.1.2.2 Modelo analítico del nivel medio del mar (NMM)

La Figura 23. muestra la serie de tiempo de nivel del mar en metros desde octubre de hasta diciembre de 2022. Durante este periodo, el nivel del mar varía en un rango entre 0,2 y 0,44 m. Después de 2020, se percibe un aumento en la frecuencia de picos altos, sugiriendo posibles episodios más regulares de niveles elevados del mar. Estas variaciones podrían deberse al fenómeno climático ENOS de El Niño o La Niña, asociados al aumento en la temperatura del agua del mar en zonas tropicales y la reducción de agua sólida continental.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 23.

Serie de tiempo de Nivel del mar



Fuente. Elaboración propia a partir de DIMAR (2023).

La Tabla 28 muestra los resultados de las pruebas de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilks) y estacionariedad (Prueba de Dickey-Fuller) para la serie de tiempo de nivel del mar. Los resultados de la prueba de normalidad sugieren que la serie de tiempo es normalmente distribuida ($p - \text{valor} > 0,05$). Por otro lado, los resultados de la prueba de estacionariedad sugieren que la serie de tiempo es estacionaria ($p - \text{valor} < 0,05$). La estacionariedad de la serie de tiempo indica que la media y la varianza de la serie de tiempo son constantes a lo largo del tiempo.

Tabla 28.

Pruebas de normalidad y estacionariedad para la serie de tiempo de nivel del mar

Prueba	p-valores
Normalidad (Shapiro-Wilks)	0,58
Estacionariedad (Dickey-Fuller)	0,01

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

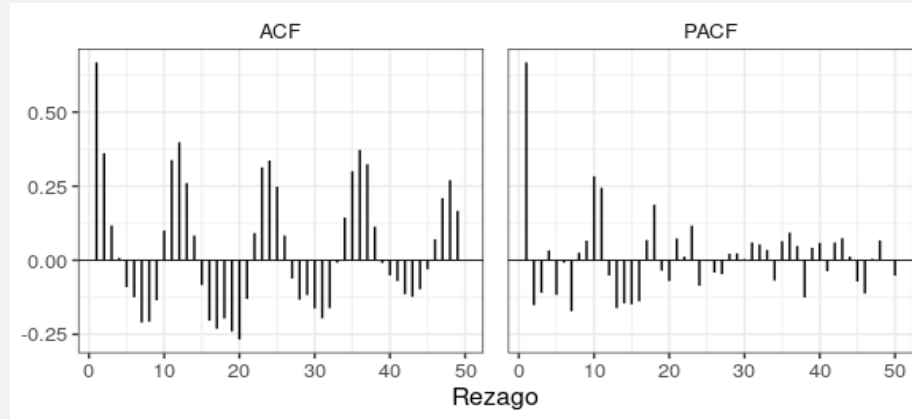
La Figura 24. muestra los diagramas de la ACF y PACF para la serie temporal del nivel del mar. La ACF muestra correlaciones fuertes en rezagos iniciales que disminuyen con el tiempo, indicando dependencia autorregresiva. Correlaciones significativas se mantienen hasta el

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

rezago 50. La PACF revela influencias directas en pocos rezagos específicos. Estos datos sugieren que un modelo ARIMA podría ser adecuado para esta serie, y que mediciones pasadas podrían ayudar a predecir futuros niveles del mar.

Figura 24.

Autocorrelación y autocorrelación parcial para la serie de tiempo de nivel del mar.



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

Se ajusta un modelo ARIMA(0,1,0) a la serie, con el valor más bajo de AIC siendo de -337. El modelo matemático se representa como:

$$\nabla x_t = w_t$$

En este escenario, x_t representa la serie temporal, w_t es el componente de ruido aleatorio y B es el operador de rezago. Se emplea la prueba de Ljung-Box para evaluar la independencia de los residuos, la cual confirma dicha independencia (p – valor $> 0,05$). Adicionalmente, la prueba de Jarque-Bera indica que los residuos no se distribuyen de manera normal (p – valor $< 0,05$). Los detalles de estas pruebas se encuentran en la Tabla 29.

Tabla 29.

Resultados de las pruebas de independencia y normalidad de los residuos del modelo

ARIMA(0,1,0) ajustado a la serie de tiempo de precipitación.

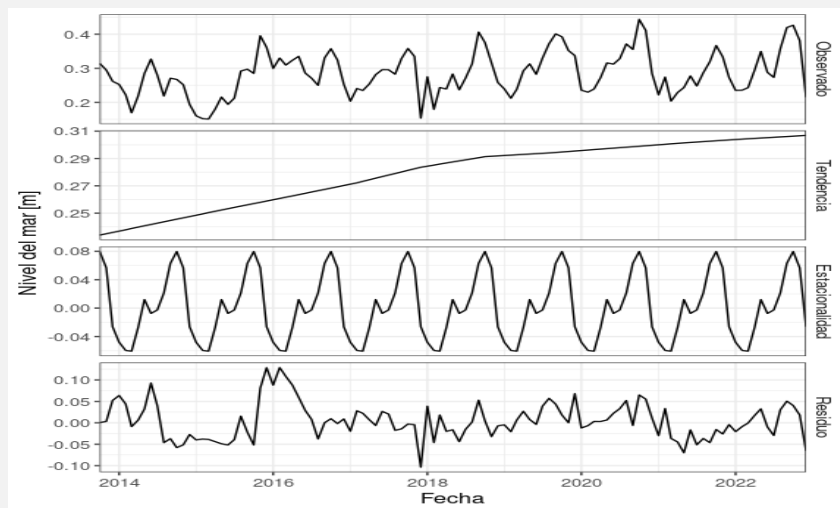
Prueba	p-valores
Independencia de residuos (Ljun-Box)	0,99
Normalidad de residuos (Jarque-Bera)	0,00

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

La Figura 25. muestra la descomposición STL de los registros del nivel del mar. La tendencia muestra que el nivel del mar ha experimentado un aumento gradual desde 2014 a 2022. Aunque hay variaciones evidentes, la subida del mar es un hecho consistente. Paralelamente, se observa una estacionalidad anual con fluctuaciones que mantienen una magnitud constante. Los residuos, que representan las diferencias entre lo observado y la descomposición, oscilan cerca de cero, pero hay desviaciones notables en algunos momentos.

Figura 25.

Descomposición STL de la serie de tiempo de nivel del mar.



Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

Para determinar si estas fluctuaciones en el nivel del mar son estadísticamente significativas, se lleva a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Este análisis prueba si la media del nivel del mar se mantiene constante a lo largo de los años.

La hipótesis inicial propone que la media del nivel del mar es la misma para todos los años ($H_0: \mu_{año_1} = \dots = \mu_{año_n}$), mientras que la hipótesis alternativa sugiere que hay al menos un año en el que la media es diferente ($H_0: \mu_{año_1} \neq \dots \neq \mu_{año_n}$). Debido a que el p – valor $< 0,05$ se deduce que la media del nivel del mar varía en al menos uno de los años estudiados. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis inicial y se concluye que ha habido un cambio notable en la media del nivel del mar a lo largo del tiempo. Tabla 30. Las fluctuaciones anuales se muestran en la Figura 26.

Tabla 30.

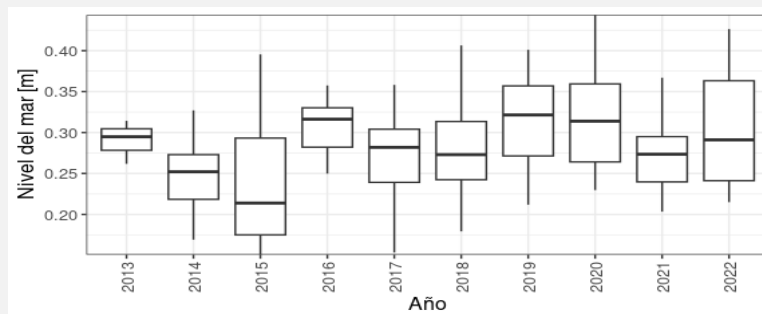
Análisis de varianza de los registros de nivel del mar por año.

Término	Grado de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Año	9	0,08	0,01	2,37	0,02
Residuos	101	0,37	0,00	-	-

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

Figura 26.

Diagramas de cajas del nivel del mar por año.



Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

Se utiliza la prueba de Student-Newman-Keuls (SNK) para analizar las variaciones significativas entre las medias anuales del nivel del mar. La Tabla 31 presenta las observaciones del nivel medio del mar para diferentes años, desde 2013 hasta 2023, todos clasificados en el grupo ‘a’. Durante este período, el nivel del mar ha variado entre 0,2 m y 0,3 m.

Específicamente, en 2013, el nivel del mar fue de 0,3 m, mientras que en 2014 y 2015 se redujo a 0,2 m. A partir de 2016 y en los años siguientes, el nivel se mantuvo en 0,3 m. Es importante señalar que, aunque la prueba es estadísticamente significativa, la magnitud de la variación en el nivel del mar (entre 0,2 y 0,3 m) es relativamente pequeña. Por lo tanto, se concluye que el nivel del mar se ha mantenido relativamente constante durante los últimos 10 años, con un ligero aumento.

Tabla 31

Grupos de años con medias similares.

Año	Nivel del mar medio [m]	Grupo
2013	0,3	a
2014	0,2	a

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

2015	0,2	a
2016	0,3	a
2017	0,3	a
2018	0,3	a
2019	0,3	a
2020	0,3	a
2021	0,3	a
2022	0,3	a

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

Se utilizó la ecuación de tasa de variación porcentual (*TV*) para evaluar los promedios anuales del nivel del mar. La fórmula aplicada es:

$$TV = \left(\frac{\bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}}{\bar{x}_{t-1}} \right) \times 100 [\%]$$

donde \bar{x}_t es la media del nivel del mar en el año t y \bar{x}_{t-1} es la media del nivel del mar en el año anterior a t . La Tabla 32 presenta la tasa de variación anual del nivel del mar. La tasa de variación anual más alta se registró entre 2015 y 2016, con un aumento del 26 %. La tasa de variación anual más baja se registró entre 2019 y 2020, con una disminución del 33 %. La tasa de variación anual promedio fue del 1 %.

La Tabla 32 muestra que el nivel del mar ha variado entre 0,2 y 0,3 m durante los últimos 9 años, equivalente a $2,7 \pm 0,5$ mm/año entre 2013 a 2022. La tasa de variación anual promedio del nivel del mar fue del 8,3 %, lo que indica un incremento en el nivel del mar constante durante los últimos 10 años, con ligeras fluctuaciones.

Tabla 32.

Tasa de variación anual para el nivel del mar

Años comparativos	Tasa de variación [%]
2013 - 2014	-15,1

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

2014 - 2015	-2,1
2015 - 2016	26,7
2016 - 2017	-11,1
2017 - 2018	4,1
2018 - 2019	10,8
2019 - 2020	1,0
2020 - 2021	-13,7
2021 - 2022	13,5

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de DIMAR (2023).

7.2 Análisis interno

7.2.1 Amenazas climáticas

Es fundamental resaltar que, según la tendencia de los resultados revelados por la encuesta, aproximadamente 80% de los encuestados sostiene que las variables climáticas analizadas, como el ascenso del nivel del mar, erosión/socavación de márgenes del puerto, lluvias extremas, vendaval (ráfagas de viento), sismos, tormenta eléctrica, altas temperaturas, entre otros, se perciben como amenazas climáticas.

En otras palabras, se reconoce que, bajo ciertas circunstancias, estas variables pueden desencadenar impactos negativos significativos. Estos hallazgos reflejan una preocupación generalizada dentro de la comunidad encuestada acerca de las posibles implicaciones adversas para las personas, la operación y la infraestructura portuaria asociadas a estas variables climáticas, subrayando así su importancia como amenazas potenciales.

Se puede determinar que los cargos directivos y jefes de operaciones perciben las tormentas eléctricas, vendavales (ráfagas de viento) y el ascenso del nivel del mar como las principales amenazas climáticas que pueden afectar en gran medida al puerto de Cartagena. Por

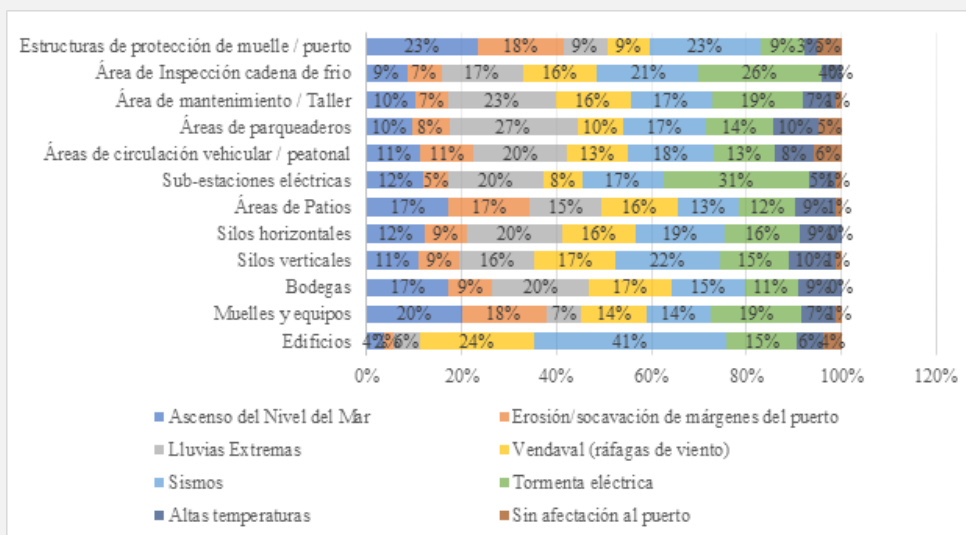
Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

otro lado, las personas de cargos de supervisión de operaciones, infraestructura y mantenimiento consideran que los mayores impactos pueden derivarse de altas temperaturas y la inundación por lluvia..

Teniendo en cuenta lo anterior, a través de la encuesta se logró determinar la percepción de las amenazas, según cada área del puerto, como se observa en la Figura 27:

Figura 27.

Porcentaje (%) de Percepción de Amenazas Climáticas según Área del Puerto en la Población Encuestada.



Los resultados indican que los sismos, las precipitaciones (inundaciones por lluvias), ascenso del nivel del mar (Inundación marina) y los vendavales (ráfagas de viento) pueden ser las amenazas más significativas. La Tabla 33 muestra la mayor amenaza percibida por área.

Tabla 33.

Amenaza climática predominante por área del puerto, según encuesta de percepción.

Área del puerto	Amenaza/variable climática
-----------------	----------------------------

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Edificios	Sismos
Muelles y equipos	Ascenso del nivel del mar
Bodegas	Inundación por lluvia
Silos verticales	Sismo
Silos horizontales	Inundación por lluvia
Áreas de Patios	Ascenso del nivel del mar y Erosión/socavación de márgenes del puerto
Subestaciones eléctricas	Tormenta eléctrica
Áreas de circulación vehicular / peatonal	Inundación por lluvias
Áreas de parqueaderos	Inundación por lluvias
Área de mantenimiento / Taller	Inundación por lluvias
Área de inspección de la cadena de frío.	Aumento del nivel del mar o tormenta eléctrica.

Fuente. Elaboración propia.

Algunas áreas del puerto pueden estar expuestas simultáneamente a dos o más variables climáticas. Para ilustrar esto, consideremos los silos horizontales, que podrían verse afectados por lluvias intensas y ráfagas de viento, causando daños en los techos e infiltración de agua, lo que podría impactar tanto en la infraestructura como en la conservación de carga granel.

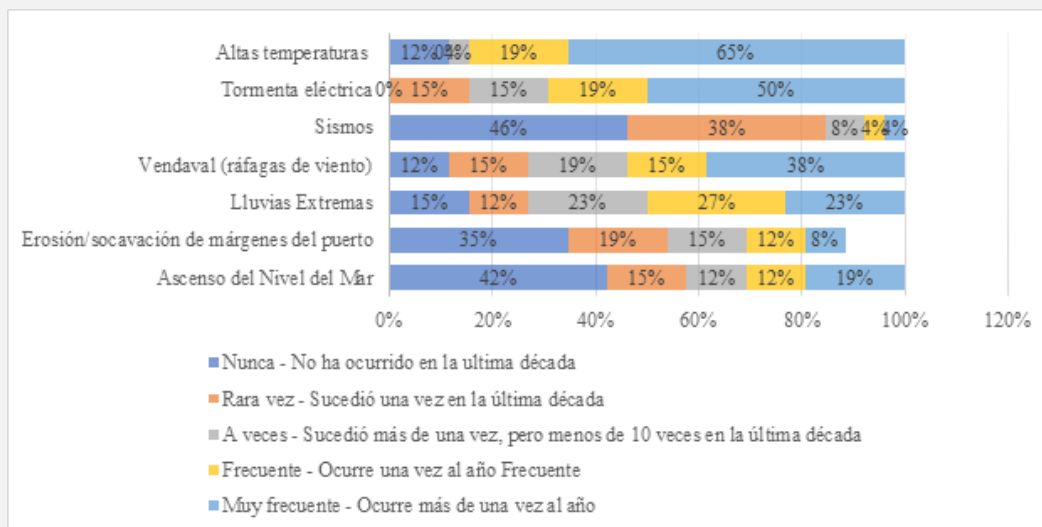
Según la Figura 29, la población encuestada ha identificado que las amenazas que ocurren con mayor frecuencia son las altas temperaturas, las tormentas eléctricas, los vientos fuertes y las lluvias extremas (inundación portuaria).

Estos eventos se caracterizan por su recurrencia anual, manifestándose más de una vez al año. En contraste, los sismos se perciben como eventos poco comunes, ya que no se ha experimentado ninguno en la última década. Según el mapa de amenaza sísmica de Colombia, Cartagena se encuentra ubicada en la zona de amenaza sísmica intermedia. Por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 6 o superior en Cartagena en los próximos 50 años es del 20 % (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2023).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 28.

Porcentaje (%) percepción sobre la posibilidad de ocurrencia para cada amenaza climática.



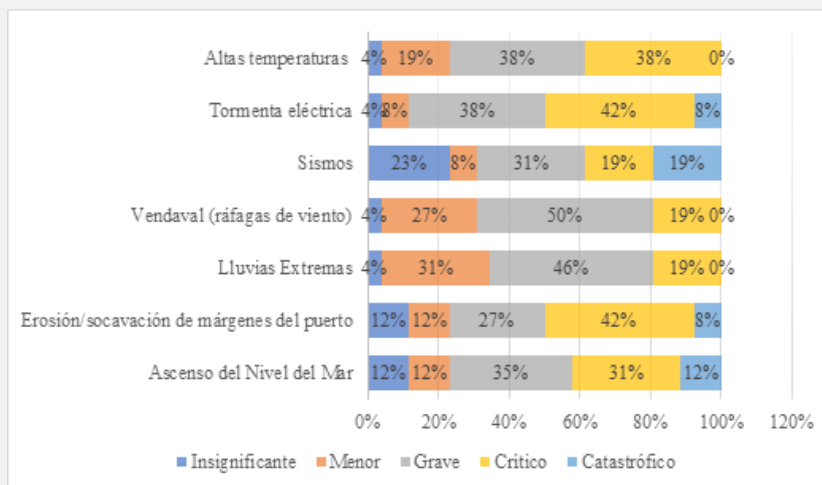
En relación con las inundaciones portuarias originadas por el incremento del nivel del mar, la percepción general sugiere que tales eventos rara vez han ocurrido, aunque un porcentaje considerable (19 %) admite desconocimiento para confirmar o descartar dicha posibilidad, ya que el fenómeno del aumento del nivel del mar y su impacto en los puertos es un tema científico complejo que puede resultar difícil de entender para la población encuestada.

Por último, se conoce la percepción con respecto a los niveles de gravedad en el caso de que ocurran las amenazas objeto de estudio. Figura 29.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 29.

Porcentaje (%) de percepción acerca de los niveles de gravedad para cada amenaza climática.



El nivel de gravedad mayoritariamente percibido por cada amenaza/variable climática se consolida en la Tabla 34.

Tabla 34.

Nivel de gravedad percibida según amenaza climática

Amenaza/ variable climática	Nivel de gravedad Percibida	Porcentaje de percepción
Altas temperaturas	Crítico	49 %
Tormenta eléctrica	Crítico	49 %
Sismos	Catastrófico	30%
Vientos fuertes	Grave	53 %
Lluvias Extremas	Grave	49 %
Erosión/socavación de márgenes del puerto	Crítico	52 %
Aumento del nivel del mar (Inundación marina)	Crítico	39 %

Fuente. Elaboración propia.

Estos datos indican que las amenazas más críticas percibidas son las olas de calor, las tormentas con descargas eléctricas, la erosión/socavación de márgenes del puerto y las

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

variaciones del nivel del mar (inundación portuaria). Las amenazas catastróficas se perciben como menos probables, como lo indica el nivel de percepción más bajo para los sismos.

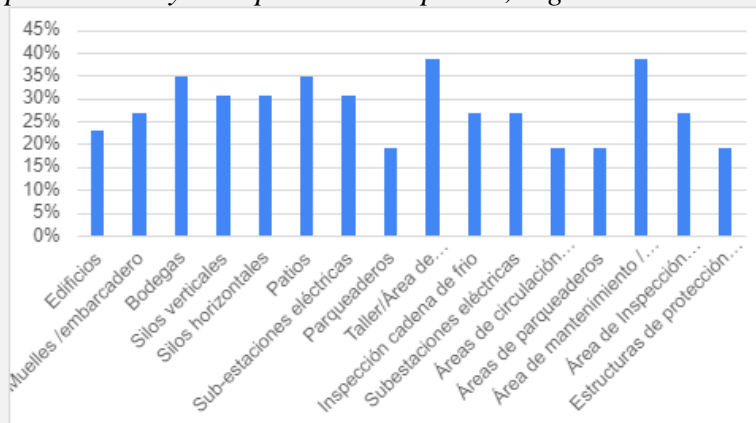
7.2.2 Exposición

Según la encuesta, las zonas más expuestas en los puertos son los muelles/embarcaderos, bodegas y silos verticales y horizontales, como muestra la Figura 30, que muestra la percepción de mayor exposición en el puerto.

Los muelles o embarcaderos son los lugares de conexión, aproximación, atraque de motonaves y de carga y descarga, además del muro perimetral del puerto son las barreras protectoras del puerto, en estas áreas se consideran como amenaza el ascenso del nivel del mar por inundación o procesos de socavación. Los muelles del terminal de Cartagena están contruidos en tabla estaca metálica y con una altura entre 1,8 a 2,0 m sobre el nivel medio del mar. (COMPAS, 2023).

Figura 30.

Nivel de exposición 'muy alto' por área del puerto, según encuesta de percepción.



Nota: Porcentaje de Funcionarios que Perciben Exposición 'Muy Alta' en Áreas del Puerto, según la escala de Likert.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

El puerto está localizado en la bahía interna de Cartagena, donde se presentan condiciones de oleaje baja a moderada energía, donde existe menor incidencia de las fluctuaciones propias del mar abierto, condición que permite operaciones más seguras ante la ocurrencia de fenómenos mareales. (Juan Gabriel Reuda Bayona, 2013). Esta combinación de factores hidrodinámicos proporciona un contexto propicio para la gestión y reducción de los riesgos asociados al aumento del nivel del mar en las operaciones portuarias.

La altura topográfica del patio 6 donde se localizan las bodegas 5, 6 y 7 expone la infraestructura al aumento del nivel del mar y oleaje. Sin embargo, de acuerdo con los registros internos las afectaciones más recurrentes se presentan por acumulación de aguas por lluvias intensas. Esta situación es potencialmente riesgosa para conservación de la carga, operaciones en el patio e integridad estructural de las bodegas, afectando la capacidad del puerto para mantener operaciones eficientes y seguras.

En este escenario, también se ve afectado el transporte interno de mercancías mediante vehículos. Las inundaciones pueden obstaculizar la movilidad de los vehículos utilizados para el transporte interno, afectando la fluidez logística y generando demoras en la entrega y distribución de mercancías..

Adicionalmente, las ráfagas de viento y la intensidad de lluvias asociadas a eventos climáticos como tormentas tropicales o huracanes añaden otro factor de exposición, pueden impactar estructuralmente a las bodegas, sus instalaciones eléctricas y la protección de las cargas generales, así como la afectación operativa en esta zona del puerto.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Los silos horizontales y verticales son susceptibles a eventos climáticos como las tormentas tropicales, los cuales pueden impactar la estabilidad estructural, la protección de los graneles, las operaciones y la capacidad de almacenamiento.

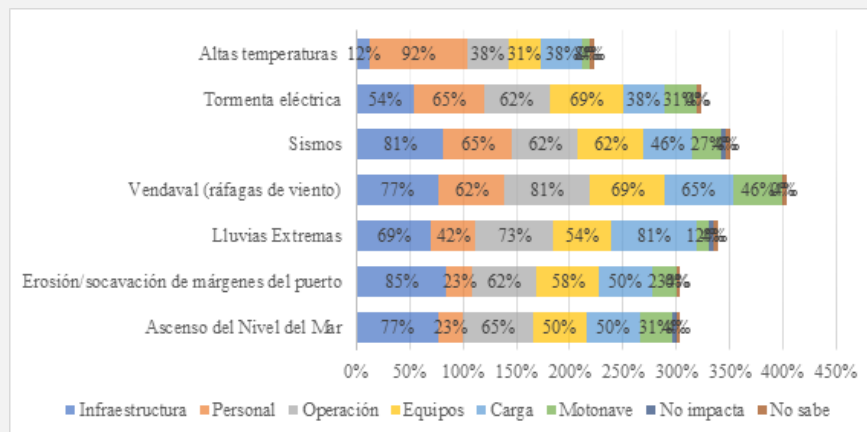
Cambios en los patrones climáticos, como lluvias intensas o cambios en la salinidad del aire, pueden contribuir a la corrosión de las estructuras metálicas, incluyendo las poleas de descarga.

7.2.3 Sensibilidad

Los resultados de percepción de las amenazas que impactan la sensibilidad de la terminal muestran que las ráfagas de viento, lluvias extremas, tormenta eléctrica y ascenso del nivel del mar son las amenazas con mayor potencial de afectación. Figura 31.

Figura 31.

Porcentaje (%) de percepción acerca de la afectación (sensibilidad) de las amenazas climáticas sobre los bienes del puerto.

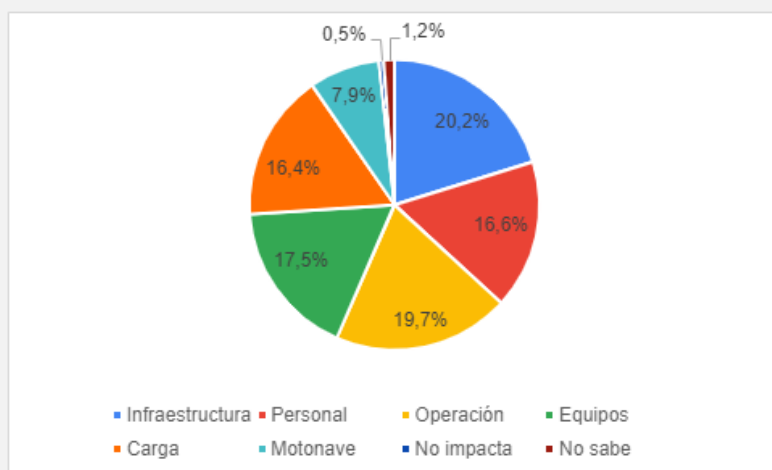


Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Además, algunas de estas amenazas también pueden afectar al personal y la carga, aunque en menor medida en comparación con la infraestructura, la operación y los equipos. La motonave parece ser la menos vulnerable a estas amenazas, con un porcentaje más bajo de impacto. El porcentaje de percepción se detalla en la Figura 32.

Figura 32.

Porcentaje (%) de percepción de la sensibilidad de los bienes e insumos portuarios.



Fuente. Elaboración propia

Se seleccionaron las amenazas que, según la percepción predominante, generan una alta sensibilidad según el tipo de insumo, como se muestra en la Tabla 35:

Tabla 35.

Amenazas Destacadas por Alta Sensibilidad en Diferentes Tipos de Insumo, Según la Percepción

Mayoritaria

Aspecto	Amenaza/variable climática	Percepción (%)
Infraestructura	Erosión/socavación de márgenes del puerto	85%
Personal	Altas temperaturas	92%
Operación	Vientos fuertes	81%

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Equipos	Tormenta eléctrica	69%
	Vientos fuertes	69%
Carga	Lluvias extremas	81%
Motonave	Vientos fuertes	46%
No impacta	Aumento del nivel del mar (inundación portuaria), Inundación por lluvia y sismos.	12%
No sabe	Todas las variables	27%

Fuente. Elaboración propia

Los resultados revelan una elevada percepción de sensibilidad en diversos aspectos vinculados con la carga, operación e infraestructura portuaria. Es particularmente notable que un porcentaje significativo de los encuestados percibe a la infraestructura portuaria propensa a la erosión y/o socavación de los márgenes del puerto. Figura 33.

Figura 33.

Afectación del muro de protección de muelles.



Fuente. Elaboración propia

La susceptibilidad y debilitamiento del muro perimetral evidencian procesos erosivos marinos, atribuibles al oleaje natural y al generado por tránsito de embarcaciones entre la Isla Diablo y la Isla Manzanillo.

Dado el alcance de la presente investigación, existen limitaciones para realizar un análisis exhaustivo que permita identificar las causas específicas de este fenómeno. No obstante, es

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

posible inferir que, en el caso particular del puerto Compas en Cartagena, ubicado sobre una unidad geomorfológica de playones, según lo señala el Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano (Posada, 2008), se destaca la presencia de áreas planas de sedimentos o arena, caracterizadas por un oleaje limitado.

El régimen del oleaje bajo que caracteriza las aguas de la Bahía interna de Cartagena facilita el movimiento de embarcaciones pequeñas a alta velocidad en diversas áreas. En este contexto, la combinación de un oleaje escaso y un frecuente tránsito puede dar lugar a un patrón distintivo de erosión y socavación en algunos sectores del muro perimetral. Particularmente, se observa deterioro del muro perimetral del Patio 6 y al costado suroccidental del Patio 1 donde la socavación es más acentuada.

Además, al considerar la socavación como un fenómeno tan marcado y específico, es crucial contemplar otros aspectos, como la posible influencia de flujos de agua subterránea que podrían debilitar el suelo que sustenta los muros de contención. Esta situación podría ser causada por eventos como lluvias intensas, infiltración de agua desde áreas circundantes o incluso la presión del agua en el subsuelo.

En menor medida, se reconoce que la infraestructura también se percibe susceptible ante amenazas como sismos, aumento del nivel del mar y vendavales. Esta percepción se fundamenta en la lógica de que los vendavales, al igual que los vientos extremos asociados a tormentas o ciclones tropicales, tienen la capacidad de ocasionar daños en estructuras no reforzadas en las terminales, como almacenes metálicos ligeros de amplia superficie y equipos portuarios.

El 92% de los encuestados considera que las altas temperaturas afectan el desempeño y salud de los trabajadores, sobretodo en roles sensibles, como operadores de equipos pesados

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

(grúas, montacargas o equipos de izaje), trabajadores de cubiertas, personal de mantenimiento y reparación, guardias de seguridad, estibadores, entre otros, cuyas labores implican la exposición a condiciones climáticas extremas durante prolongadas jornadas laborales.

A pesar que no existen registros históricos que demuestren incapacidades médicas o episodios críticos de salud, asociado a la exposición de altas temperaturas en los años objeto de estudio, los funcionarios lo perciben como un riesgo a tener en cuenta a futuro.

En este contexto, es alentador observar que se contempla la implementación de medidas preventivas. La adopción de las recomendaciones prácticas sobre Seguridad y salud a cielo abierto de la OIT, ratificadas en la reunión de expertos en Ginebra en octubre de 2017, proporciona directrices claras. Se planea limitar la exposición al sol tanto para el personal propio como para los contratistas mediante el uso de indumentaria adecuada, incluyendo gafas de sol, capuchas y cascos. Además, se prevé la reducción de los períodos de exposición mediante la facilitación de zonas de sombra y la aplicación de crema de protección solar en la piel expuesta al sol.

Cabe destacar que la Resolución 2400 de 1979 también respalda estas medidas, especificando la provisión de equipos de protección ocular y ropas ligeras y resistentes al calor para los trabajadores expuestos a radiaciones infrarrojas intensas.

En cuanto a la operación portuaria, la mayoría de los participantes en la encuesta percibe una vulnerabilidad frente a ráfagas de viento. Se destaca que vientos fuertes pueden tener un impacto significativo en las operaciones, especialmente en las tareas de carga y descarga. Este fenómeno se atribuye a la existencia de umbrales de velocidad del viento para la operación de grúas portuarias, que limitan la movilización de la grúa a velocidades del viento inferiores a 72

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

km/h y la operación de izaje de carga a menos de 86 km/h, conforme a las especificaciones técnicas del fabricante, Liebherr.

Según las indicaciones, ante ráfagas de viento se aconseja detener la operación, posicionar las plumas de la grúa en el suelo y asegurarlas en los medios de soporte. Esto se realiza para prevenir que el viento ejerza fuerzas laterales excesivas sobre la grúa. Estas precauciones garantizan la integridad de la carga y proteger la seguridad de los operadores y otras personas en el área de trabajo.

Por otro lado, se observa que las altas precipitaciones son un factor más común para la interrupción de la operación en comparación con los vientos fuertes.

La sensibilidad se extiende a los equipos y a la carga, especialmente frente a amenazas como tormentas eléctricas, ráfagas de viento e inundaciones por lluvia intensa. Esto destaca la importancia de proteger tanto los equipos críticos como la carga almacenada en áreas portuarias durante eventos climáticos adversos.

Las grúas son particularmente vulnerables a daños causados por vientos superiores a los 180 km/h y descargas eléctricas de acuerdo con registros internos de reparaciones, generando pérdida temporal de la capacidad productiva del equipo.

La inhabilitación parcial del área de muelle 1 también contribuyó a la complejidad de la situación, limitando las capacidades de atraque y descarga en esa ubicación específica. Además de los desafíos operativos, se debieron tener en cuenta los costos asociados al daño, que fueron desde los gastos de reparación del equipo hasta las pérdidas derivadas de la interrupción de las operaciones normales.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Sin embargo, es importante destacar que la percepción de sensibilidad varía entre los diferentes insumos y las amenazas climáticas evaluadas. Por ejemplo, la motonave se percibe como menos susceptible en comparación con otros aspectos, como la infraestructura o el personal.

Por último, se observa que un pequeño porcentaje de encuestados considera que algunas amenazas climáticas no tienen un impacto significativo en los insumos evaluados, mientras que otro grupo expresó una falta de conocimiento sobre este tema.

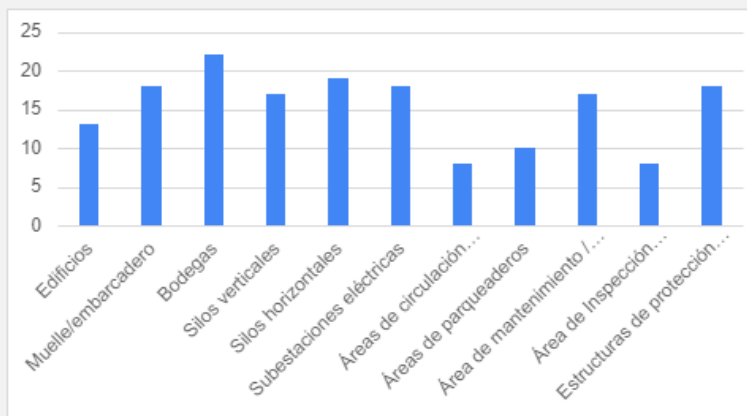
7.2.4 Medidas de adaptación

A continuación, se relaciona la percepción de la necesidad de aplicar medidas de adaptación por área de operación. Siendo las bodegas, silos (verticales y horizontales) y muelles, las áreas que requieren de mayor intervención para alcanzar la resiliencia.

Los resultados reflejan una percepción generalizada entre los encuestados sobre la necesidad de implementar medidas de adaptación y protección en varias áreas de infraestructuras portuarias.

Figura 34.

Percepción de la necesidad de medidas de adaptación por área de operación



Fuente. Elaboración propia

Estos resultados proporcionan una visión clara de las áreas que, según la percepción de los encuestados, requieren una atención prioritaria en términos de mantenimiento en infraestructuras portuarias.

7.2.5 Gestión Interna del Cambio Climático

La encuesta revela una diversidad de opiniones sobre si Compas aborda las amenazas y la vulnerabilidad portuaria en su programa de gestión del cambio climático. Aunque muchos encuestados están de acuerdo en que la organización aborda estos temas, un 15% de respuestas indecisas indica posibles áreas de incertidumbre, especialmente entre roles estratégicos (directivos).

En cuanto a las acciones implementadas por Compas frente al cambio climático, hay un conocimiento generalizado entre los encuestados. Sin embargo, destaca que solo el 36% reconoce medidas cruciales para la resiliencia climática del puerto, como la formulación de

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

medidas específicas de adaptación. Esto sugiere que la adaptación puede ser un concepto menos visible y técnico en comparación con la mitigación.

La importancia de la comunicación se destaca claramente en los resultados, ya que el 92% respalda la idea de que Compas debe comunicar sus políticas, planes y medidas relacionadas al cambio climático. La minoría en desacuerdo o indecisa brinda oportunidades para abordar preocupaciones específicas o proporcionar información adicional.

El 88,4% de los encuestados está de acuerdo en que Compas debe involucrar a las comunidades de influencia directa en la gestión y las medidas contra el cambio climático. Todos los participantes están de acuerdo en que la empresa debe formar parte de agrupaciones locales o regionales para abordar desafíos y adoptar estrategias de adaptación.

En relación con los recursos financieros y el análisis de vulnerabilidad en el presupuesto, el 88,4% lo considera estratégico. Sin embargo, la minoría indecisa, especialmente entre los gerentes, señala posibles desafíos relacionados con la percepción de la importancia de la planificación a largo plazo.

Estos hallazgos ofrecen a Compas una visión valiosa para fortalecer su enfoque frente al cambio climático, abordando incertidumbres, mejorando la comunicación y considerando medidas específicas de adaptación en su estrategia.

7.2.6 Aplicación de Matriz DOFA

Tabla 36.

Aplicación de Matriz DOFA

DEBILIDADES	FORTALEZAS
<p>La ausencia de datos específicos de carácter histórico, como registros de interrupciones operativas o afectaciones a la infraestructura debido a condiciones climáticas adversas, señala una debilidad en la recopilación y disponibilidad de información necesaria para tomar decisiones.</p> <p>A pesar que se reconoce la socavación o erosión del muro perimetral como una amenaza, existen limitaciones en el análisis específico de las causas de este fenómeno.</p> <p>Gestión interna y comunicación para la gestión del cambio climático, fortalecer la participación comunitaria y considerar medidas de adaptación en la estrategia de la empresa.</p> <p>No existe actualmente un presupuesto asignado a medidas de adaptación al cambio climático.</p> <p>En las pólizas y seguros, los daños a equipos, infraestructura u operaciones, actualmente no se encuentran cubiertas ante variables climáticas, a excepción de la descarga eléctrica.</p> <p>Ausencia en el organigrama de cargo especializado en la coordinación y supervisión de la gestión del cambio climático. En su defecto, la inclusión de responsabilidades en los manuales de funciones en cargos estratégicos.</p> <p>Ausencia de un sistema de monitoreo o alertas tempranas ante amenazas climáticas, que permita la planeación anticipada de procesos susceptibles a verse interrumpido o afectados.</p>	<p>Existe una conciencia generalizada con respecto a las consecuencias adversas del cambio climático y una clara preocupación por las amenazas climáticas percibidas, lo cual permite una planificación más integral de la gestión de riesgos.</p> <p>Compas ha elaborado un plan estratégico que abarca tanto la mitigación como la adaptación al cambio climático, incorporando diversas acciones como la medición de la huella de carbono y la identificación de la vulnerabilidad de sus puertos frente a los efectos del cambio climático, entre otras iniciativas.</p> <p>Alto nivel de conocimiento sobre las acciones implementadas por Compas en respuesta al cambio climático. Esto refleja un compromiso significativo de la organización en la mitigación y adaptación climática.</p> <p>La identificación específica de áreas críticas, proporciona una visión clara al dirigir la atención y los recursos hacia las áreas más susceptibles y en riesgo.</p> <p>La identificación de los riesgos asociados a variables climática, ha permitido que Compas implemente medidas a corto plazo para la adaptabilidad: Implementación de instrumentos para la medición de las velocidades del viento en las grúas, instalación de pararrayos y la existencia de documentos PON que contempla operaciones del puerto ante eventos climáticos como lluvias torrenciales o vientos fuertes.</p>
AMENAZAS	OPORTUNIDADES

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

DEBILIDADES	FORTALEZAS
<p>El puerto de Cartagena enfrenta amenazas climáticas significativas, destacándose la preocupación por altas temperaturas, tormentas eléctricas, vientos fuertes y lluvias extremas.</p> <p>La exposición varía según las áreas, siendo los muelles, bodegas y silos particularmente susceptibles a múltiples amenazas simultáneas, tales como vientos fuertes, lluvias extremas y tormentas eléctricas.</p> <p>El aumento de las temperaturas a futuro, o la ocurrencia del fenómeno de La Niña, puede ocasionar riesgos a la salud y seguridad en cargos mayoritariamente expuestos.</p> <p>Falta de incentivos económicos para las empresas e instituciones que lideran estos procesos.</p> <p>Se identifica una carencia significativa en la coordinación entre las autoridades portuarias y de transporte en lo que respecta a los avances sectoriales en cambio climático.</p> <p>Desventaja competitiva frente a otros puertos con mayor capacidad adaptativas al cambio climático.</p>	<p>Articulación del sector portuario en el Plan de Gestión Integral del cambio climático PIGCCT de Cartagena de Indias, representa una oportunidad para alinear acciones conforme a las políticas de desarrollo locales.</p> <p>La capacidad de administrar recursos y acceder a fondos de cooperación internacional. Acceso a fuentes de financiación en el marco de la política de Gestión del cambio climático, a nivel nacional e internacional (Agenda 2050).</p> <p>Incentivos para Inversiones Privadas Sostenibles en Infraestructura Portuaria, en el marco del documento CONPES 4118 de 2023.</p> <p>En 2024-2025, el Ministerio de Transporte, con apoyo de ANI y Cormagdalena, liderará la creación de incentivos para impulsar inversiones privadas en infraestructura portuaria, promoviendo competitividad y eficiencia.</p> <p>Un plan de Ordenamiento Territorial (POT) recién actualizado, que contempla proyectos de inversión en materia de infraestructura portuaria para la resiliencia, mejoramiento de vías, proyectos de mitigación y recuperación de manglares, entre otros.</p>

Fuente. Elaboración propia

7.2.7 Estimación de emisiones GEI actuales y futuras del puerto

La Compañía realiza la medición de su huella de carbono siguiendo los criterios establecidos en 2018, basados en estándares reconocidos como el GHG Protocol del World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), cumpliendo con la norma ISO 14064-1:2006. La medición se enfoca en seis gases asociados al cambio climático (COMPAS, 2023)

Las emisiones se clasifican en tres alcances:

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

✓ **Emisiones Directas (Alcance 1):**

Incluyen las generadas directamente por la compañía, como el uso de combustibles para su flota, gases refrigerantes y tratamiento de aguas residuales.

✓ **Emisiones Directas (Alcance 2):**

Corresponden a las emisiones derivadas del consumo de energía eléctrica suministrada por empresas regionales para cada terminal de operación.

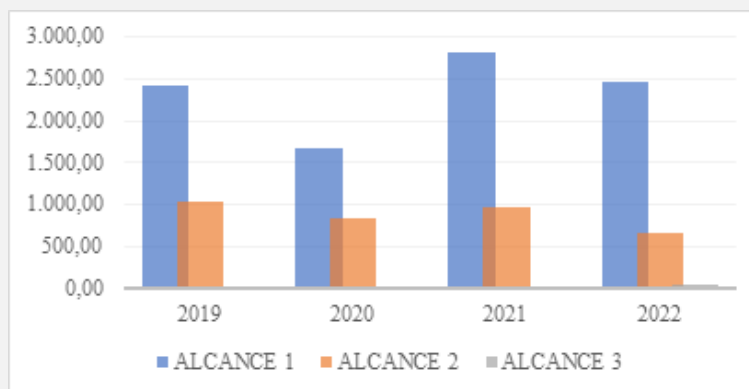
✓ **Otras Emisiones Indirectas (Alcance 3):**

A partir del año 2022, se inicia la medición de este alcance, considerando emisiones relacionadas con el consumo de papel, uso de celulares y vuelos nacionales de los funcionarios.

La Figura 35 detalla los resultados de emisiones por alcance para los últimos cuatro (4) años en términos de Toneladas Equivalentes de CO₂:

Figura 35.

Emisiones en Toneladas equivalentes de CO₂, periodo 2019-2022.



Fuente. Informe de Gestión, Compas 2023.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- El Alcance 1 muestra fluctuaciones en las emisiones directas a lo largo de los años, con un aumento notable en 2021.
- El Alcance 2 muestra una disminución general en las emisiones indirectas asociadas al consumo de energía eléctrica, siendo más baja en 2022.
- El Alcance 3, al iniciarse en 2022, presenta emisiones relacionadas con factores no considerados en los años anteriores, como el consumo de papel, uso de celulares y vuelos nacionales.

7.3 Evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático

Los eventos meteorológicos derivados de la variabilidad y el cambio climático suponen un reto para la sostenibilidad de los puertos marítimos en cualquier contexto. En esta revisión se analizan los componentes que permiten evaluar y calcular la vulnerabilidad del puerto marítimo Compas Cartagena, a partir de información reportada en el análisis interno y los registros meteorológicos para la definición de amenazas, exposición, sensibilidad, impacto potencial y capacidad de adaptación para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de la infraestructura, las operaciones, el personal y los componentes de la carga transportada. Esto permitirá formular medidas de adaptación para que el sistema de la terminal sea más resistente.

7.3.1 Amenazas

Las amenazas reportadas en el análisis interno permiten establecer que los eventos climáticos y del mar que tienen un mayor impacto en el sistema del puerto Compas Cartagena son las altas temperaturas, lluvias extremas, las ráfagas de viento, el ascenso del nivel medio del mar y las tormentas eléctricas.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Los datos de los registros técnicos y la evaluación cuantitativa de parámetros físicos, derivados de registros históricos de tipo meteorológico o mareográfico, como el registro de eventos y consecuencias derivadas de la materialización de las condiciones de amenaza constituyen un insumo imprescindible en la definición certera de las condiciones de amenaza en un sistema (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

7.3.1.1 Altas temperaturas

Los escenarios del cambio climático estiman que la temperatura promedio entre el periodo 2011-2040 podrían sufrir un aumento de 0,9 °C y para 2100 hasta unos 2,2 °C respecto a la actual. La Tabla 37. muestra cuales son los escenarios del cambio climático para en periodo 2011-2100 en el departamento de Bolivar.

Tabla 37.

Escenarios de cambio climático para el departamento de Bolívar.

Periodo	Δ Temperatura	Δ Precipitación %
2011 - 2040	0,9	-15,1
2041 - 2070	1,6	-15,2
2071- 2100	2,2	-17,1

Fuente. Elaboracion propia con base en IDEAM, 2015.

Según la encuesta realizada a los empleados de Compas Cartagena, el 46% cree que las altas temperaturas pueden suponer una amenaza para el rendimiento físico de los trabajadores en zonas como patios, muelles, almacenes y silos. El 84% cree que las altas temperaturas son frecuentes o muy frecuentes.

Los meses más calurosos del año son de mayo a septiembre, y la temporada de lluvias en la región es de mayo a agosto, lo que aumenta la humedad, lo que incide en el incremento del

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

índice de calor. Entre 2019 y 2022, se han registrado temperaturas que oscilan entre 24,6°C y 36,1°C. Sin embargo, el índice de calor ha variado de 24 a 61°C debido a la humedad relativa del aire. Las temperaturas en el percentil 90 del índice de calor, que es de 48°C, se consideran una amenaza y entran en la clasificación de condiciones peligrosas para la salud humana según el índice de estrés térmico. Esta información se presenta en la Tabla 11.

De acuerdo con los registros de seguridad y salud en el trabajo de la terminal de Compas Cartagena hasta el 2023 no existen registros de afectaciones físicas, golpe de calor o insolación durante el desarrollo de actividades del puerto.

7.3.1.2 Lluvias y lluvias extremas.

El comportamiento de las lluvias en la región Caribe de Colombia, muestra que siguen un régimen similar al histórico con un leve aumento en términos de volumen, sin embargo, las precipitaciones de alta intensidad (tormentas y aguaceros) tienen una tendencia leve a aumentar su frecuencia y por lo tanto su impacto en toda la región. (Armenta & Ruiz, sf.)

De acuerdo con los escenarios del cambio climático pueden darse aumentos a largo plazo de no más de 10% para la zona costera del Departamento de Bolívar. Se espera que haya un incremento del 30% de los eventos de precipitación intensa para el año 2040, es decir, un aumento en la probabilidad de ocurrencia y frecuencia de lluvias extremas que pueden causar inundaciones generalizadas en la ciudad de Cartagena (IDEAM, 2015).

De acuerdo con 50% de las personas del puerto Compas Cartagena, es frecuente o muy frecuente que se presenten lluvias intensas a lo largo del año, estos eventos tienen un impacto significativo tanto en la infraestructura como en las operaciones del puerto, ya que se ven

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

afectadas las bodegas 4, 1, 2, 8 y 9 principalmente, inundación parcial del costado nororiental del patio 6 y detiene las operaciones del puerto por condiciones de seguridad laboral y protección de la carga.

Los datos de precipitaciones entre 2003 a 2022 permite identificar la cantidad de días en los que se ha presentado lluvias en diferentes rangos de intensidad, el número de días en los que han ocurrido lluvias muy fuertes a torrenciales extremas, es decir, por encima de 50 mm/día es de 76 días.

Los reportes de daños en la infraestructura indican que estos ocurren durante lluvias muy fuertes en el área del puerto, es decir, a partir de 50 mm/d, sin embargo, las operaciones de izaje, carga y descarga de contenedores puede llevarse hasta con una lluvia fuerte inferior a 35 mm/d condiciones en la cuales se afecta la maniobrabilidad y visibilidad. Las operaciones de carga y descarga de granel no puede hacerse durante la lluvia por afectación grave del producto, por lo que podría considerarse que incluso una lluvia débil ocasiona el cese de esta labor, es decir, desde 1 mm/día, se considera como amenaza.

La Tabla 38 muestra las condiciones de amenaza consideradas de acuerdo con la intensidad de lluvia en el puerto de Compas Cartagena: carga/descarga granel >10 mm/día; naranja izado de carga, 35 mm/d; rojo infraestructura >50 mm/d.

Tabla 38

Amenazas asociadas a lluvia y afectación.

Amenaza	Intensidad	Afectación
Lluvia	>1 (mm/d)	Carga/descarga de graneles
Lluvia fuerte	>35 (mm/d)	Carga/descarga de contenedores, acero, operaciones, transporte interno de cargas
Lluvia extrema	>50 (mm/d)	Infraestructura, equipos

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Fuente. Elaboración propia con base información Compas 2023.

7.3.1.3 Ráfagas de viento

Los vientos que representan una amenaza a la actividad portuaria impactan directamente a la operación de izaje de cargas (contenedores y general), carga/descarga de graneles y la integridad de la infraestructura en general. Teniendo en cuenta estas condiciones, tomando como amenaza el percentil 90 de las velocidades históricas entre el periodo 2003 a 2022 para la ciudad de Cartagena, es de 88 km/h.

No obstante, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de una de las grúas con las que cuenta el puerto (LHM 550) la velocidad máxima para movilización de la grúa es de 72 km/h, mientras la velocidad de operación es inferior a 86 km/h. Velocidades del viento superiores a 150 km/h exigen que el equipo se encuentre en posición de estacionamiento y velocidades superiores a 180 km/h implican alto riesgo de volcamiento de la grúa. (Wolfgang. E, 2023).

En este documento se adopta como amenaza a las operaciones de izaje de cargas por ráfagas de viento a flujos con velocidades superiores a 86 km/h.

El 53% del personal del puerto considera que considera que las ráfagas de viento son una amenaza para el puerto, el 14% considera que la ocurrencia de vendavales amenaza muelles y los equipos de carga, mientras el 17% lo considera una amenaza para los silos y 24% para los edificios administrativos del puerto.

7.3.1.4 Aumento del nivel del mar

El aumento en el nivel del mar está determinado por la expansión térmica dado el aumento de la temperatura de los océanos y el aumento por masas de hielo que no se forman en los continentes por el aumento de las temperaturas globales, (IPCC, 2007).

Sin embargo, no es el único mecanismo identificado, el hundimiento de tierras costeras por compactación de sedimentos y movimientos debido a estructuras geológicas locales que pueden elevar o hundir el suelo costero, obteniendo consecuentemente un movimiento relativo del nivel del mar. Restrepo-Ángel et al. (2021).

De acuerdo con los análisis del nivel relativo del mar, entre 1950 a 2010 el aumento en el nivel del mar ha sido de $2,5 \pm 1,3$ mm/año Restrepo-Ángel et al., (2021), resultado congruente con la tasa hallada en el modelo analítico de este estudio de $2,7 \pm 0,5$ mm/año para 2013-2022, es decir, un ascenso del nivel del mar entre 20 a 30 mm en el periodo analizado.

No obstante, de acuerdo con Restrepo et al., (2021) la Bahía de Cartagena sufre un aumento relativo del nivel del mar incluso mayor, de $5,3 \pm 0,1$ mm/año, lo que puede asociarse al efecto sumado de incremento en el nivel del mar Caribe y el movimiento vertical relativo estructural y subsidencia por compactación de sedimentos, lo que en términos prácticos correspondería a un ascenso de unos 48 mm en el periodo contemplado (2013-2022), corresponde a una diferencia del 92% superior al contemplado únicamente por el ascenso asociado al cambio climático.

En este estudio se indica que la estimación de aumento del nivel del mar basados únicamente en los análisis globales e incluso regionales no son considerados adecuados para la evaluación de la vulnerabilidad, planificación y protección costera. Teniendo en cuenta esta

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

condición, es aconsejable realizar los análisis de ascenso con base en estaciones mareográficas ubicadas en cercanías a la localidad analizada y con controles topográficos periódicos para evaluar el movimiento relativo relacionado con el aumento del nivel del mar y el movimiento causado por subsidencia.

De acuerdo con las proyecciones del nivel del mar para Cartagena del Climate Data Center, University of Hamburg citado por Restrepo-Ángel et al., (2021), y los escenarios RCP para emisiones de GEI futuras se perfilan los siguientes resultados de elevación para la ciudad de Cartagena.

Como amenaza relativa al ascenso del nivel medio del mar, se establece el aumento que iguale o supere la diferencia de altura topográfica entre la infraestructura del puerto y el ascenso del nivel del mar proyectado de acuerdo con el escenario RCP que se ajuste a las emisiones de GEI futuras para el año contemplado. Tabla 39

Tabla 39

Proyecciones nivel medio del mar para diferentes escenarios RCP.

RCP	Año	Aumento del nivel del mar (m)
4.5	2050	0,24
	2100	0,52
8.5	2050	0,26
	2100	0,76

Fuente. Climate Data Center, University of Hamburg citado por Restrepo-Ángel et al., (2021).

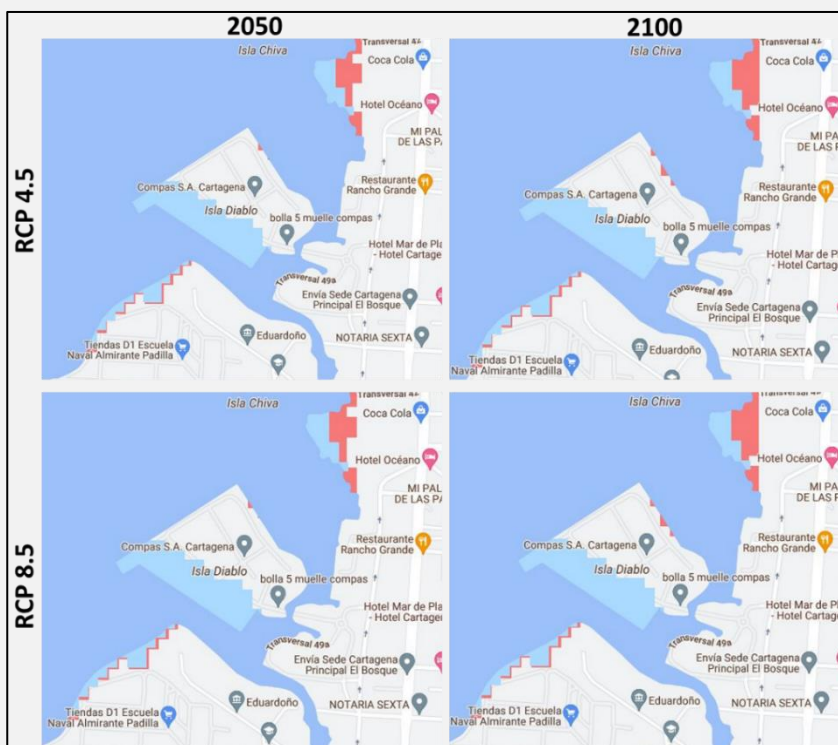
De acuerdo con el levantamiento topográfico del puerto Compas Cartagena del año 2016, el punto más bajo de la infraestructura interna se localiza en el Patio 6 a una altura de 0,49 m sobre el nivel del mar. (COMPAS, 2016).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Los resultados de la herramienta de detección de riesgos costeros de Climate Central muestran los escenarios de ascenso del nivel del mar para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y se resumen en la Figura 36. (Climate Central, 2021).

Figura 36.

Proyección de nivel del mar RCP 4.5, RCP 8.5 para 2050 y 2100

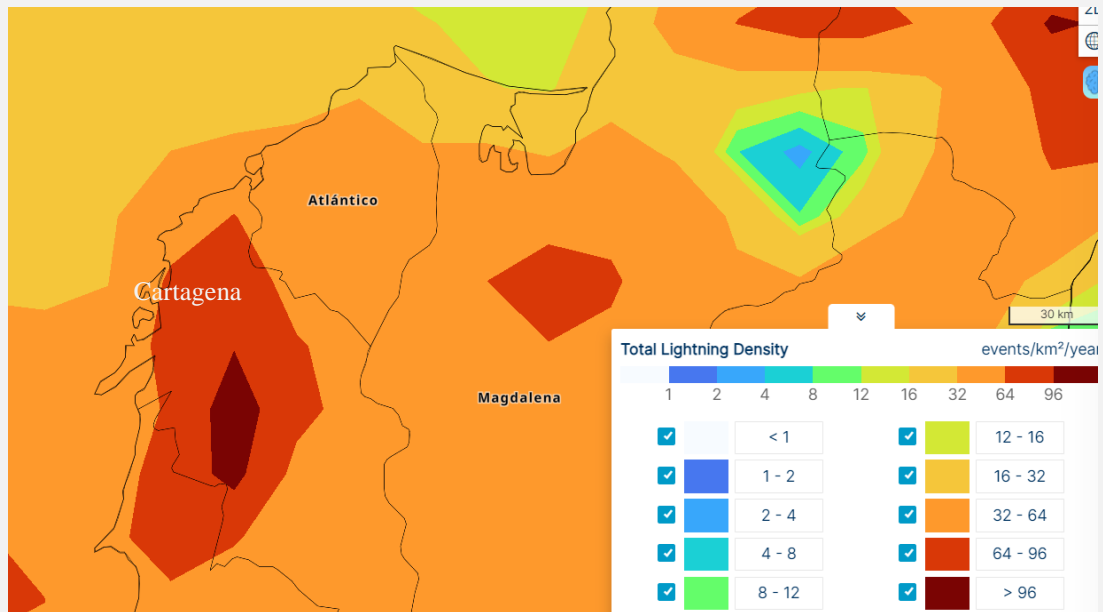


Fuente. Elaboración propia con herramienta de detección de riesgos costeros. (Climate Central, 2021).

La actividad de rayos es un riesgo potencial para las seguridad del personal y la integridad de los equipos portuarios. La Vaisala Lightning muestra densidad de tormentas eléctricas en el puerto de Cartagena que justifican la implementación de medidas que reduzcan los riesgos por descargas eléctricas. Se establece como amenaza tormentas eléctricas que se localicen a menos de de la terminal 3 km alrededor del puerto como umbral para la activación de protocolos preventivos.

Figura 37.

Densidad de eventos de tormenta eléctrica en Cartagena.



Fuente: Vaisala Xweather lightninging. (Vaisala, 2024).

7.3.2 *Exposición*

Los registros muestran con qué frecuencia se dan en la zona del Puerto de Compas Cartagena valores de índice de calor que se consideran una amenaza para la salud de los trabajadores. Esto supone un riesgo mayor para los trabajadores que trabajan en recintos cerrados con ventilación limitada, como bodegas o silos.

La frecuencia de ocurrencia se resume en la Tabla 40 Según estos resultados, la probabilidad de ocurrencia (PO) se considera baja (10,3%) para el periodo 2019-2022, con una frecuencia mayor de mayo a noviembre, época de lluvias en la que aumenta la humedad relativa del aire y por consiguiente el índice de calor.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 40

Frecuencia anual de ocurrencia IH >48 °C.

Año	Frecuencia anual	PO
2019 – 2022	10,3%	Poco probable 5

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

La frecuencia en la que se presentan lluvias que afectan las operaciones de carga y descarga de graneles (>1mm/d), el izaje de cargas (>35mm/d) y la integridad de la infraestructura (>50 mm/d) y calificación de PO para estas condiciones de amenaza se resumen en la Tabla 41.

Tabla 41

Frecuencia de ocurrencia de intensidades de lluvia.

ENOS	>1 mm/d	PO	>35mm/d	PO	>50 mm/d	PO
El Niño	8-9 %	Poco probable	5	2 – 3%	1%	
Fase Neutral	10-11%	Probable	7	2 – 3%	0,3 - 1%	Muy poco probable
La Niña	11 - 15%			4 - 7%	1,6 – 2,4 %	4

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

Entre 2014 y 2018 se produjeron ráfagas de viento con velocidades superiores a 78 km/h. Estas ráfagas afectan la operación e infraestructura portuaria. La probabilidad de que se produzca esta amenaza se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42.

Frecuencia anual de ocurrencia Velocidad del viento >78 km/h

Año	Frecuencia anual	PO
2014 – 2018	29%	Probable 7

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Respecto al ascenso del nivel medio del mar en el mar Caribe y específicamente en el área del puerto de Cartagena existe alta certeza de que el escenario RCP 4.5 se materialice de acuerdo con las emisiones GEI de los últimos años, mientras el escenario RCP 8.5 menos favorable considera que los controles de emisiones no son suficientes para reducir la tasa del aumento en la temperatura global. (Restrepo Ángel, y otros, 2021), (IPCC, 2013). (CEN, 2023).

De esta manera, se estima la probabilidad de ocurrencia del ascenso del nivel del mar.

Tabla 43.

Tabla 43.

Probabilidad de ocurrencia de ascenso de nivel del mar según los escenarios IPCC.

Año	Ascenso NMM (m)		>0,5 m NM. PO
2022 - 2050	0,5	Muy improbable	1
2050 RCP 4.5	0,24	Probable	9
2100 RCP 4.5	0,52	Bastante probable	9
2050 RCP 8.5	0,26	Probable	10
2100 RCP 8.5	0,76	Bastante probable	10

Fuente. Elaboración propia a partir de Datos de IDEAM (2023), (CEN, 2023), Compas Cartagena (2016), Climate Data Center, University of Hamburg citado por Restrepo-Ángel et al., (2021).

7.3.3 Sensibilidad

La estimación de las potenciales afectaciones que pueda sufrir el sistema portuario de Compas Cartagena en caso de que se materialicen las condiciones de amenaza en los aspectos de infraestructura, operación, cargas y salud humana se resumen en la Tabla 44.

Tabla 44.

Consecuencias esperadas y calificación (CE) por ocurrencia de amenazas.

Amenaza	Aspecto							
	Infraestructura		Operación		Carga		Salud humana	
Alta temperatura	Mínima	3	Menor	4	Menor	4	Grave	9

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Amenaza	Aspecto							
	Infraestructura		Operación		Carga		Salud humana	
Lluvias extremas	Significativa	5	Importante	7	Grave	9	Importante	7
Ráfagas de viento	Significativa	5	Importante	7	Importante	7	Grave	9
Ascenso nivel del mar	Muy grave	10	Grave	9	Grave	9	Mínima	3
Descarga eléctrica	Menor	4	Importante	7	Importante	7	Muy grave	20

Fuente. Elaboración propia basado en (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

El personal del puerto considera que las consecuencias se asocian a la ocurrencia de vendavales con un 69% descarga eléctrica por tormenta con un 50%, seguido de vendavales que consideran grave y crítico el 69% y lluvias extremas el 55 % lo considera grave y crítico. La socavación de las márgenes de la infraestructura del puerto es considerada por el 42% como crítico y el 8% catastrófico.

7.3.4 Impacto potencial

Los posibles impactos que pueden causar la materialización en los escenarios presente y proyectados a los años 2050 y 2100 permiten evaluar las consecuencias en el funcionamiento del sistema portuario en los aspectos evaluados de infraestructura y equipos, operaciones, carga y la salud del recurso humano que labora en el puerto. La Tabla 45 muestra la identificación de los posibles impactos actuales y futuros en caso de que se materialicen las amenazas, contemplando el caso menos favorable. (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

Tabla 45.

Impacto potencial por ocurrencia de amenazas.

Amenaza	Valor	Infraestructura	Equipos	Operaciones	Integridad de la carga	Seguridad SST y ambiental
Alto índice de Calor IH	>48°C	NA		Ampliación de tiempo en operaciones por requerimiento de pausas del personal	NA	Golpe de calor, fatiga, desmayo. Afectación a salud humana.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Amenaza	Valor	Infraestructura Equipos	Operaciones	Integridad de la carga	Seguridad SST y ambiental
Alta temperatura	>34°C	Deterioro techos y láminas	Aumento de la demanda de energética carga refrigerada	Combustión espontánea de gases en graneles	
Lluvias	>1 mm/d	NA	Carga y descarga de granel	Riesgo deterioro de graneles	NA
Luvia fuerte	>35 mm/d	Inundación parcial patios, muelles, estacionamientos de edificios, infiltración en edificios	Carga y descarga granel, demora operaciones, afectación operaciones patio 6, interrupción acceso a bodegas 2, 3 y 4. Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.	Deterioro de graneles y calidad de carga.	Baja visibilidad, peligro de caídas a nivel. Arrastre de material particulado de granos a cuerpos de agua superficiales
Lluvias extremas	>50 mm/d	Daños en techos de bodegas, colmatación de bajantes silos horizontales, drenajes aguas lluvias, trampas de grasas.	Detención, retrasos de operaciones y transporte al interior del terminal. Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.	Daños en carga general	Peligro caídas, reducción visibilidad, maniobrabilidad vehículos. Arrastre de material particulado de graneles a cuerpos de agua superficiales
Ráfagas de viento	>76 km/h	Daños en techos de bodegas, colmatación de bajantes silos horizontales, drenajes aguas lluvias, trampas de grasas	Detención de operaciones, transporte interno. Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.	NA	Peligro de caídas, afectación ocular por material particulado.
Oleaje por tránsito de embarcaciones pequeñas	-	Deterioro de muro perimetral Patio 6, daño parcial de enrocado, pérdida de capacidad de portante del suelo. Afectación del enrocado por generación de oleaje, por tránsito de	Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves. Afectación del relacionamiento con comunidades de influencia directa, por tránsito de embarcaciones.	Afectación de carga de graneles, aceros, carga general, contenedores, por inundación marina	NA

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Amenaza	Valor	Infraestructura Equipos	Operaciones	Integridad de la carga	Seguridad SST y ambiental
		embarcaciones pequeñas.			
Aumento nivel del mar 2022-2050	>0,5 m	Socavación muro perimetral Patio 6, daños en muro y malla perimetral.	Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.		
NMM RCP 4.5 2050	0,24 m	Socavación muro perimetral Patio 6, daños en muro y malla perimetral.	Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.		Contaminación de aguas marinas por inundación de muelles y patios, arrastre de material particulado de graneles
NMM RCP 8.5 2050	0,26 m				
NMM RCP 4.5 2100	0,52 m	Inundación marina del patio 6, Mal drenaje de aguas lluvias.	Inhabilitación de área nororiental de patio 6 para uso, circulación de equipos y carga.		
NMM RCP 8.5 2100	0,76 m	Pérdida de área de maniobras Pérdida de capacidad de soporte de suelo	Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.		
Tormenta eléctrica	< 3 km	Daño equipos de izaje. Daño en infraestructura y generadores eléctricos	Detención de operaciones.	Daños en carga general Fuente de ignición, chispas y combustión	Quemaduras, descarga eléctrica, fatalidad

Fuente. Elaboración propia

7.3.5 Índice de Riesgo Climático Empresarial IRCE

El análisis de riesgos climáticos empresariales IRCE aborda dos componentes: (1) probabilidad de ocurrencia PO y (2) las consecuencias esperadas, CE. Ecuación 1. La Tabla 46 resume el cálculo del IRCE para los impactos potenciales previstos en caso de materialización de la amenaza. (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

Los resultados de la evaluación del IRCE para el puerto Compas Cartagena indica que, de no tomarse acciones de control y que se materialicen las amenazas el sistema portuario se vea

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

afectado por el riesgo inherente del sistema portuario de acuerdo con la escala de calificación de riesgo (Tabla 6) con los siguientes resultados:

7.3.5.1 **R5. Riesgo muy alto.**

Este riesgo potencial corresponde a los accidentes que comprometan la salud y seguridad de las personas en cualquiera de los trabajos de la operación del puerto bajo amenaza de tormenta eléctrica y ráfagas de viento en exteriores de las áreas industriales, los impactos potenciales son:

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 46.

Cálculo de Índice de riesgo climático empresarial IRCE.

Actividad / Entidad	Alta temp.	Lluvia	Lluvia		Ráfaga viento	Actual	Nivel medio del mar NMM				Descarga eléctrica
			fuerte	extrema			RCP 4.5 2050	2100	RCP 8.5 2050	2100	
Edificios	R1	R0	R1	R1	R3	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Bodegas	R1	R0	R1	R1	R3	R0	R0	R1	R1	R1	R1
Muelles	R0	R0	R0	R0	R0	R0	R0	R1	R1	R1	R1
Patios 1, 2, 3 ,4 y 5	R0	R0	R1	R1	R0	R0	R0	R1	R1	R1	R1
Patio 6	R0	R0	R3	R3	R0	R1	R2	R3	R2	R2	R1
INF Silos verticales	R1	R0	R1	R1	R2	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Silos horizontales	R1	R0	R1	R2	R3	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Cobertizo	R0	R0	R1	R2	R3	R0	R0	R1	R1	R1	R1
Áreas transito / parqueadero	R0	R0	R1	R1	R2	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Muro perimetral	R0	R0	R1	R2	R2	R0	R0	R3	R2	R1	R0
EQP Grúas portuarias	R0	R0	R0	R1	R2	R0	R0	R0	R0	R0	R2
Subestaciones eléctricas	R1	R0	R1	R2	R3	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Carga descarga granel	R1	R3	R3	R3	R4	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Carga/descarga contenedor	R1	R2	R3	R3	R4	R0	R0	R0	R0	R0	R1
OP Carga descarga acero	R1	R2	R3	R3	R4	R0	R0	R0	R0	R0	R1
Transporte interno carga	R1	R2	R3	R3	R4	R0	R0	R2	R1	R1	R1
Operaciones generales	R1	R0	R3	R3	R4	R0	R0	R2	R1	R1	R1

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

	Navegación/atraque motonave	R1	R0	R2	R2	R3	R0	R0	R0	R0	R0	R1
	Transporte externo	R0	R0	R2	R2	R2	R0	R0	R0	R0	R0	R1
	Granel	R3	R2	R2	R3	R3	R0	R0	R0	R0	R0	R1
CRG	Acero	R0	R0	R0	R0	R1	R0	R0	R0	R0	R0	R1
	Contenedor	R0	R0	R0	R0	R1	R0	R0	R0	R0	R0	R1
PEL	Comunidades	R0	R0	R1	R1	R2	R0	R0	R2	R1	R1	R0
	Salud personal	R2	R0	R2	R5	R5	R0	R0	R0	R1	R0	R5
SST	Accidentes	R2	R2	R3	R5	R5	R0	R0	R0	R1	R0	R5
	Vehículos	R0	R0	R3	R2	R3	R0	R0	R0	R1	R0	R1

Fuente. Elaboración propia basado en (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- **Descarga eléctrica:** daño a la salud personal, quemaduras y fatalidad por descarga eléctrica.
- **Ráfagas de viento y lluvia extrema:** accidentes por caídas a nivel, por trabajos en altura, caídas desde el muelle al mar, golpes por caída de objetos, accidentes por circulación de vehículos en áreas de operación y tránsito.

Este tipo de riesgo requiere acciones urgentes para el control, como los existentes actualmente en los protocolos y procedimientos de operación, salud y seguridad en el trabajo del puerto.

7.3.5.2 **R4. Riesgo Alto**

Riesgo potencial durante las operaciones de carga y descarga, y movilización de equipos en patios o muelles de cualquier tipo durante la ocurrencia de ráfagas de viento.

Este tipo de riesgo puede ser controlado por protocolos y procedimientos de operación del puerto para el manejo seguro de cargas y protección de cargas en consonancia con el comandante de la motonave u operaciones exclusivas Compas y movilización de equipos en zonas industriales.

7.3.5.3 **R3. Riesgo medio**

Nivel de riesgo potencial asociado a la ocurrencia de lluvias a lluvias extremas durante la carga y descarga de graneles en cualquier etapa de la operación. Izaje y transporte en áreas de muelle y patios de contenedores y aceros, traslados de equipos, operaciones en general y transporte de personal en vehículos o peatonal. Este nivel de riesgo se atribuye también al almacenamiento de graneles en silos ante lluvias fuertes y extremas, así como ráfagas de viento.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Este nivel de riesgo requiere la evaluación de acciones inmediatas procedimiento operacional en cuanto manejo, transporte y conservación seguro de cargas y equipos; medidas de mejoramiento de capacidad adaptativa de silos y bodegas; protocolos de seguridad y salud en el trabajo.

El riesgo de inundación por lluvias y mal drenaje, inundación marina del Patio 6 en el escenario RCP 4.5 para 2100 muestran riesgo potencial de esta área del puerto, así como procesos de socavación por oleaje en el muro y mallas perimetrales, así como pérdida de capacidad portante de la superficie del Patio. Figura 38 y Figura 39.

Este riesgo exige el mejoramiento de los sistemas de drenaje y seguimiento del ascenso relativo del nivel del mar respecto a las cotas de los diferentes puntos de referencia de control topográfico versus el mojón de la Estación mareográfica del CIOH ubicada en la Isla Manzanillo. Además del análisis de elevación de la superficie del costado norte del patio 6 y reforzamiento del muro perimetral del mismo patio.

Se calcula un riesgo medio en la pérdida de calidad de graneles por elevación de temperaturas por encima de 30°C durante el almacenamiento en los silos horizontales y verticales. Este riesgo puede controlarse con procedimientos de reducción de temperatura y ventilación preventiva en las operaciones de graneles.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Figura 38

Acumulación de aguas lluvias en el sector nororiente del Patio 6.



Fuente. Elaboración propia, visita de campo Compas Cartagena, 2023.

Figura 39.

Colmatación de canal de aguas lluvias, costado suroccidente de Patio 3 y nororiente de Patio 6.



Fuente propia, visita de campo Compas Cartagena, 2023.

7.3.5.4 R2. Riesgo bajo

Este riesgo se atribuye a la ocurrencia de inundación parcial por amenazas de lluvias fuertes que provocan la inundación parcial en el costado norte del patio 6 por la colmatación del

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

drenaje de aguas lluvias que del Patio 3 y Cobertizo, adicional hay una evacuación, esta condición ocurre por salida ineficiente de las aguas lluvias que provienen de las bodegas 7 y 9 (cobertizo) y del costado sur del patio 3.

El sistema de evacuación de aguas lluvias se encuentra superado por el volumen de agua y los drenajes superficiales a lo largo del muro perimetral de patio 6 no tiene suficiente capacidad de evacuación de aguas.

Con este tipo de riesgo se califican las maniobras de aproximación y atraque de las motonaves en caso de ocurrencia de lluvias fuertes y extremas, así como cuando existen ráfagas de viento especialmente cuando las motonaves presentan bajo peso relativo por carga reducida.

En cuanto a la salud del personal del puerto, existe el riesgo de inhalación y proyección de material particulado a ojos y respiración.

Las comunidades y el componente ambiental aledañas a las instalaciones del puerto presentan un riesgo moderado por aguas de escorrentía derivadas de lluvias fuertes y extremas o ráfagas de viento que arrastran material particulado y colmatación de separadores de sólidos y grasas producto de caída en patios de maniobras carga y descarga de graneles y residuos del área de mantenimiento al nororiente del Patio 2.

Este riesgo potencial se contempla igualmente para las operaciones de movilización de equipos y grúas en los muelles, así como el transporte externo a las instalaciones del puerto. Las medidas de control deben estimar labores de limpieza del muelle, protocolos de operación segura en caso de lluvias fuertes y extremas, movilización interna de vehículos y de peatones en áreas de muelle y patios.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

En el caso de las vías externas, habilitación en conjunto con las autoridades del municipio y departamento de corredores alternos para movilización de carga de entrada y salida dentro y fuera de la ciudad de Cartagena.

El riesgo de inundación marina del Patio 6 y el muro perimetral de la terminal en el escenario RCP 8.5 para 2050 y 2100 muestran potencial afectación de esta área del puerto, procesos de socavación por oleaje en el muro y mallas perimetrales.

7.3.6 Capacidad adaptativa

La capacidad del sistema portuario de Compas Cartagena para adaptarse a las condiciones meteorológicas ejercidas por la variabilidad y los extremos climáticos permiten evaluar su resiliencia actual e identificar sus debilidades, para el análisis de la vulnerabilidad.

De acuerdo el Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016) se evalúan con las variables que pueden ayudar a disminuir la vulnerabilidad del sistema portuario frente a las amenazas actuales y futuras en términos de variables transversales como planeación gubernamental y empresarial, recursos económicos, infraestructura y tecnología, e información y conocimiento.

7.3.6.1 Variables transversales: planificación gubernamental y empresarial.

Algunos instrumentos que abordan los desafíos del cambio climático, la planeación ambiental y están creados para afrontar las circunstancias que afrontan los sectores económicos y en especial el portuario se resumen en la Tabla 47.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 47.

Instrumentos de planeación nacional, regional y local que incluyen el componente de gestión del cambio climático y sostenibilidad del sector portuario.

Instrumentos de planeación	Componente de adaptación al cambio climático
CONPES 4118 DE 2023	<p>Eje estratégico 1. Articular el sistema portuario con los instrumentos de planeación territorial y las condiciones físicas y ambientales de línea de costa en los litorales colombianos, para cerrar la brecha entre el crecimiento portuario y el desarrollo del territorio</p> <p>Eje estratégico 2. Promover la incorporación de buenas prácticas ambientales y de responsabilidad social empresarial del sistema portuario nacional para consolidar la visión de sostenibilidad socioambiental del sistema portuario</p> <p>Incentivos a las inversiones privadas en el marco del Eje estratégico 5. Actualizar los instrumentos regulatorios del sistema portuario colombiano para promover el crecimiento, competitividad y modernización de los puertos que lo integran</p>
El Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de los arroyos directos al Caribe Sur y la ciénaga de La Virgen (POMCA)	Adoptado por CARDIQUE, integra la gestión del riesgo y el cambio climático en la planificación territorial, incluyendo sistemas de alertas tempranas y evaluación de amenazas. Se destaca la incorporación de escenarios de cambio climático a procesos de ordenamiento ambiental territorial.
El POMCA del Canal del Dique	Programa gestión para la protección del sistema cenagoso asociado al canal del Dique. - Programa conservación de la biodiversidad terrestre. - Programa de restauración de humedales del canal del Dique. - Programa de conservación de la integridad ecológica y la biodiversidad de los humedales.
Planes de Ordenamiento y Manejo de la Unidad Ambiental Costera (POMIUACS)	caracterización, diagnóstico y zonificación ambiental se erigen como pilares fundamentales para respaldar la gestión ambiental en las zonas costeras, enfocados en las amenazas del cambio climático y el ordenamiento territorial. Sus líneas de acción se centran en la conservación de ecosistemas y el desarrollo compatible con la sostenibilidad.
Plan de Ordenamiento Territorial (POT)	El actualizado Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Cartagena para 2023 se centra en afrontar los desafíos del cambio climático y fomentar el desarrollo sostenible. Entre sus principales acciones se encuentran la identificación de recursos y financiamiento para evaluar riesgos climáticos, la expansión de la infraestructura verde y azul con criterios sostenibles, la implementación del Plan Integral de Gestión al Cambio Climático (PIGCC 4C), análisis de adaptación de la estructura boscosa, creación de sumideros de CO2 urbanos, estudios de riesgo y adaptación climática, planificación portuaria y de transporte de carga, restauración de bahías clave, ejecución del Macroproyecto para la Restauración del Canal del Dique, y medidas para el control de inundaciones y estudios morfológicos de la plataforma continental. Estas iniciativas buscan abordar integralmente los impactos climáticos, proteger ecosistemas críticos y fortalecer la resiliencia del distrito ante el cambio climático.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Fuente. Elaboración propia, basada en cada documento de planeación.

7.3.6.2 Recursos económicos

Algunos instrumentos que permiten la financiación de las medidas y proyectos de adaptación se resumen en la Tabla 48.

Tabla 48.

Recursos económicos identificados en instrumentos de planeación nacionales, regionales y territoriales.

Presupuesto/ Posibles fuentes de financiación (Oportunidades)	Monto
CONPES 4118: Esquema de incentivos para garantizar inversiones del sector privado en la infraestructura portuaria, orientadas a la competitividad y eficiencia en la operación portuaria del país (Recursos para 2024 y 2025, contemplados en el PGN)	\$320.000.000
Plan de Desarrollo de Cartagena 2020-2023: Programa aseguramiento, monitoreo, control y vigilancia ambiental (sistema integrado de monitoreo ambiental)	\$545.000.000
POT 2023: Plan Local Portuario, el cual busca fortalecer e incentivar la actividad portuaria del distrito.	\$900.000.000
PIGCC-4C: Plan de gestión del cambio climático de Cartagena de Indias.	\$1.500.000.000

Fuente. Elaboración propia basado en los documentos de planeación.

7.3.6.3 Infraestructura y tecnología

Las condiciones de capacidad adaptativa que pueden permitir afrontar los desafíos del cambio climático y reducir la vulnerabilidad mediante el aumento de la resiliencia en los aspectos que componen el sistema portuario de Compas Cartagena se resumen en la Tabla 49.

Tabla 49.

Requerimientos en infraestructura, operación, protección de la carga, seguridad y salud en el trabajo

Amenaza	Condiciones en capacidad adaptativa			
	Infraestructura	Operación	Carga	Salud humana

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Alta temp.	Edificios: climatización y aislación térmica de oficinas. Bodegas, silos horizontales: con escasa ventilación natural. Uso de láminas de resistencia térmica regular.	Protocolo de operaciones de acuerdo con requerimientos de trabajo planeación y trabajo seguro para personal, equipos.	Silos con ventilación únicamente en puertas de acceso, paredes sin flujo de aire.	Recomendaciones de la Organización Internacional del Trabajo (OIT). Resolución 2400 de 1979. Plan de emergencias y desastres y PON sin asociación a condiciones de IH elevado.
Lluvias extremas	Cobertizo: techo en nave estructural de pendiente única. Permite el ingreso de agua ante lluvias fuertes y con vientos. Edificios con aislamiento e impermeabilizado en terrazas y oficinas. Bodegas, silos horizontales y cobertizo: estructuras adaptadas para resistir lluvias intensas, canales de aguas lluvias adecuados. Pacios, parqueaderos, muelles, áreas de maniobras: mantenimiento, corrección y limpieza regular de obras de drenaje de aguas lluvias.	Protocolos detallados para operaciones en diferentes escenarios de condiciones de lluvia según documento RTO.	Carga dispuesta en áreas elevadas y bien drenadas en el puerto excepto Cobertizo, patio 6.	Plan de emergencias y desastres y PON, para abordar las condiciones climáticas de extremas.
	Área de maniobras, muro perimetral, y postes de iluminación del Patio 6 costado norte: nivel de terreno, obras de drenaje, condiciones de circulación. Gestión documental y registro de mantenimientos preventivos y correctivos de daños por lluvias.	Registro detallado de ocurrencias, duración de eventos de amenaza.	En área de maniobras de patio 6.	
Ráfagas de viento	Bodegas. Reparaciones y adecuaciones permiten mejorar su resiliencia estructural. Su resiliencia estructural. Anemómetros en equipos de izaje.	Procedimientos y cese de operaciones durante ráfagas de viento. No se permite traslado de equipo a más de 72 km/h.	Granel, en silos. Apilado de seguro contenedores, tubería en patios.	Plan de emergencias, desastres y PON, no abordan específicamente esta amenaza.
Ascenso nivel del mar	Condiciones generales con elevación segura de patios, superficies de patios permeables, Adecuación de drenajes de aguas lluvias suficiente en Patio 6 costado norte, Patio 3 y bodega 3. Adecuación de. muro y malla perimetral.	Operaciones de adecuan a las condiciones de infraestructura, restricción de operaciones en costado norte Patio 6, muro perimetral y malla de protección.	Cargas en costado norte patio 6 no seguras.	-
Descarga eléctrica	Apantallamiento de protección a infraestructura susceptible, equipos y	Protocolo de cese de actividades en caso	Apantallamiento, protección	Plan de emergencias y

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

subestaciones eléctricas con aterrizaje y protección. Protección a descargas en grúas.	de descarga eléctrica. Protección operarios.	bodegas a almacenamiento y silos.	de desastres y PON para atención de descarga eléctrica. Detención temprana tormentas eléctricas a 3 km de la terminal
---	--	-----------------------------------	--

Fuente. Elaboración propia

7.3.6.4 **Variables sociales: Información y conocimiento.**

Aspectos sociales relacionados con la información y el conocimiento amplio de las implicaciones del cambio climático y el impacto de cada una de las acciones con las amenazas potenciales sobre sistema portuario y ambiental del entorno en el área de influencia del área del puerto de Cartagena. Tabla 50.

Tabla 50.

Variables de información y conocimiento del cambio climático en Compas Cartagena.

Variable	Descripción
Disponibilidad de información en la empresa y en sus agentes clave,	La información relacionada con novedades asociadas a eventos climáticos actualmente es escasa, dispersa y aislada. La recopilación de estos datos se realiza a través de diversas áreas y procesos, utilizando métodos y formatos variados. Esta falta de estandarización dificulta la comparación efectiva de la información y obstaculiza la capacidad de identificar tendencias o patrones significativos.
Conocimiento del riesgo y/o de las oportunidades,	La empresa ha demostrado una perspectiva proactiva al identificar y reconocer riesgos vinculados a eventos climáticos, mostrando interés en mejorar.
Existencia de precedentes de actuación, existencia de metodologías,	En la terminal se han implementado medidas de adaptación, reforzamiento de infraestructuras y optimización de procesos, producto de investigación realizada por la IFCC en el año 2010. En otras terminales se han realizado estudios de vulnerabilidad.
Grado de conocimiento e implicación por parte de los empleados de las empresas, los clientes y las comunidades del entorno,	Si bien existe un conocimiento y preocupación generalizada, se requiere fomentar la cultura de implementación de medidas adaptativas y sus proyecciones al corto y mediano plazo (Priorización e inclusión en los presupuestos anuales).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Existencia de programas de entrenamiento,	Se debe fortalecer con la implementación de talleres prácticos y simulacros.
Disponibilidad de información de estudios de caso, antecedentes de movimientos o conflictos socioambientales,	Antecedente de estudio realizado por la IFCC en el año 2010.

Fuente. Elaboración propia.

7.3.7 *Evaluación de vulnerabilidad al cambio climático*

El cálculo del índice de vulnerabilidad empresarial permite evaluar la predisposición o fragilidad de un sistema o elemento del sistema ante la materialización de una amenaza a pesar de la capacidad que posea para enfrentar dicha amenaza. De acuerdo, con el resultado del VuCE se tienen los siguientes resultados del índice de vulnerabilidad de los elementos que componen el sistema portuario de Compas Cartagena. Tabla 51.

Estos resultados indican que tanto la infraestructura, como operaciones, carga, personas y relacionamiento social del puerto Compas Cartagena tiene calificaciones que oscilan entre vulnerabilidad media (V3) y despreciable (V0).

7.3.7.1 **Vulnerabilidad media. V3**

Esta calificación de vulnerabilidad se atribuye a las condiciones actuales del costado nororiental del Patio 6 por la acumulación de aguas lluvias cuando suceden precipitaciones intensas, estas provenientes del nororiente del Patio 6, Patio 3 y el cobertizo de inspección, afectando parcialmente el tránsito, operación y posiblemente las cargas en esta área.

El muro y malla perimetral han sufrido deterioro continuado y falla estructural con posible pérdida de capacidad portante del suelo, lo que puede originar inclinación de postes eléctricos y la superficie adoquinada irregular.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Tabla 51

Resultados de la evaluación del Índice de vulnerabilidad al cambio climático VuCE para el sistema portuario de Compas Cartagena.

Actividad / Entidad	Alta temp.	Lluvia	Lluvia		Ráfaga viento	Nivel medio del mar NMM				Descarga eléctrica	
			Fuerte	Extrema		Actual	RCP 4.5		RCP 8.5		
							2050	2100	2050		2100
Edificios	V1	V0	V1	V1	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
Bodegas	V1	V0	V1	V2	V2	V0	V0	V1	V1	V1	V1
Muelles	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V1	V1	V1
Patios 1, 2, 3, 4 y 5	V0	V0	V1	V1	V0	V0	V0	V1	V1	V1	V1
Patio 6	V0	V0	V3	V3	V0	V1	V2	V3	V2	V2	V1
INF Silos verticales	V1	V0	V1	V1	V1	V0	V0	V0	V0	V0	V1
Silos horizontales	V1	V0	V1	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
Cobertizo	V0	V0	V2	V2	V3	V0	V0	V1	V1	V1	V1
Áreas transito / parqueadero	V0	V0	V1	V1	V1	V0	V0	V0	V0	V0	V1
Muro perimetral	V0	V0	V2	V2	V2	V0	V0	V3	V2	V2	V0
EQP Grúas portuarias	V0	V0	V0	V1	V1	V0	V0	V0	V0	V0	V2
Subestaciones eléctricas	V1	V0	V1	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
Carga descarga granel	V1	V2	V2	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
OP Carga descarga contenedor	V1	V1	V2	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
Carga descarga acero	V1	V1	V2	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

	Transporte interno de carga	V1	V1	V2	V2	V2	V0	V0	V2	V1	V1	V1
	Operaciones generales	V1	V0	V2	V2	V2	V0	V0	V2	V1	V1	V1
	Aproximación y atraque motonaves	V1	V0	V1	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
	Transporte externo	V0	V0	V2	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
	Granel	V2	V1	V2	V2	V2	V0	V0	V0	V0	V0	V1
CRG	Acero	V0	V0	V0	V0	V1	V0	V0	V0	V0	V0	V1
	Contenedor	V0	V0	V0	V0	V1	V0	V0	V0	V0	V0	V1
RP	Comunidades	V0	V0	V1	V1	V1	V0	V0	V1	V1	V1	V0
	Salud personal	V1	V0	V1	V2	V2	V0	V0	V0	V1	V0	V3
SST	Accidentes personal	V1	V1	V2	V2	V2	V0	V0	V0	V1	V0	V3
	Vehículos	V0	V0	V2	V1	V2	V0	V0	V0	V1	V0	V1

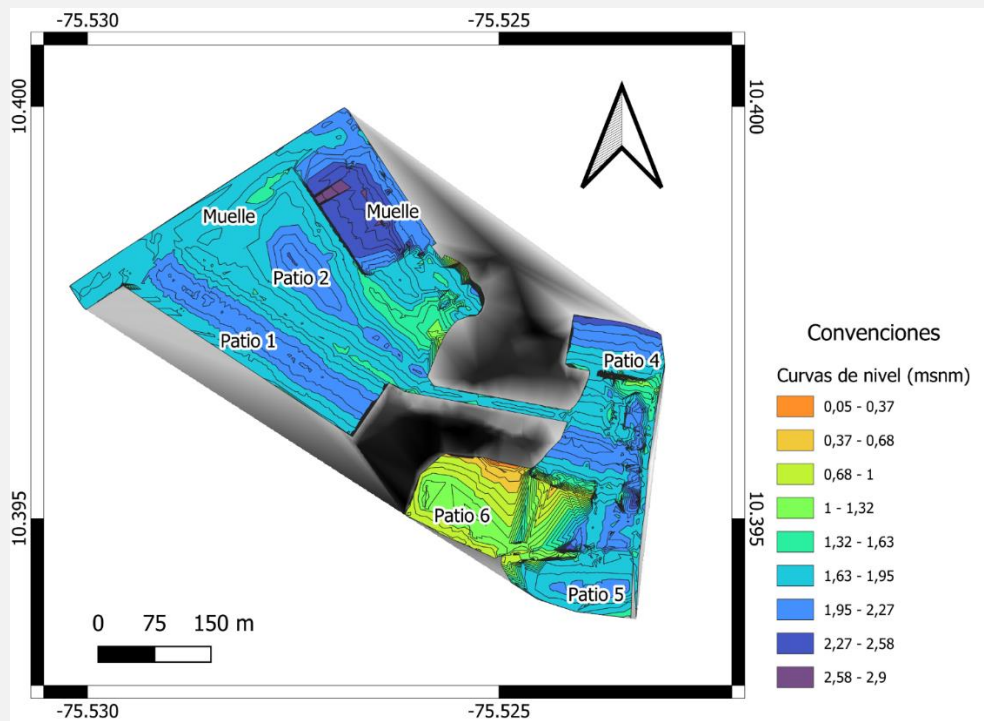
Fuente. Elaboración propia basado en (MADS, Invemar, Mintransporte, 2016).

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

De la misma manera, el Patio 6 se califica como vulnerable ante el ascenso del nivel del mar los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para 2100. (COMPAS, 2016). La Figura 40 muestra que el patio 6 es el área más baja de la terminal, haciendola vulnerable a inundación por aguas lluvia, pobre drenaje y potencial inundación marina futura.

Figura 40

Topografía del puerto Compas Cartagena



Fuente. Elaboración propia a partir información Compas, 2016.

La Bodega 3, cobertizo de inspección se considera vulnerable a las ráfagas de viento y las lluvias extremas e incluso en lluvias fuertes, dado el diseño estructural en techo estructural recto a una pendiente leve, sin cubrimiento frontal de la bodega que permite la disposición de los contenedores para el escaneo de seguridad. Este diseño hace vulnerable a los equipos de escaneo

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

ante daños por entrada de agua a la base de la bodega. Esta configuración hace necesaria la detención de labores durante lluvias.

Por último, existe vulnerabilidad media ante el riesgo de descarga eléctrica y afectación de las personas en áreas abiertas no cubiertas por el apantallamiento de protección ante descargas eléctricas dispuesto por Compas Cartagena para proteger las estructuras, grúas y equipos elevados del puerto.

7.3.7.2 Vulnerabilidad baja. V2

Este nivel de vulnerabilidad se califica las condiciones de temperatura de almacenamiento de granel en los silos verticales y horizontales por pérdida potencial de calidad del producto por condiciones de temperatura que pueden exceder los 38 °C, esta condición exige el seguimiento y gestión continua del personal encargado de graneles para la reducción de la temperatura. En este procedimiento debe tenerse en cuenta el descanso periódico del personal que ejecuta la labor con el objeto de evitar la exposición a altas temperaturas e índices de calor elevado.

La carga y descarga de graneles presenta una vulnerabilidad baja gracias a los controles desde las motonaves y en silos que permiten la suspensión de labores ante potenciales lluvias mínimas a extremas.

La descarga y transporte de cargas de contenedores y acero desde motonaves, muelle y patios se restringe en caso de lluvias moderadas, fuertes y extremas, así como ráfagas de viento. Igual condición se presenta para la navegación, aproximación y atraque de motonaves, transporte

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

de equipos en muelle, y patios, así como vehículos y peatones en las mismas condiciones meteorológicas adversas y ante visual limitada.

Las personas que laboran en el área industrial del puerto tienen una calificación de baja vulnerabilidad de acuerdo con los procedimientos de seguridad y salud en el trabajo que restringen labores y tránsito en áreas abiertas del puerto en caso de lluvias moderadas, fuertes y extremas, ráfagas de viento y tormenta eléctrica.

El Patio 6 tiene presenta una vulnerabilidad baja por inundación marina en los escenarios RCP4.5 para 2050 y RCP 8.5 para 2050 y 2100.

Aunque la vulnerabilidad de los parqueaderos de Casablanca tiene un resultado bajo, es necesario que se adelanten trabajos de mantenimiento y limpieza de los drenajes de aguas lluvias que impidan el deterioro de las condiciones de la base del adoquiado, así como evitar accidentes producto del tránsito de personas hacia sus vehículos. Figura 41.

Figura 41.

Acumulación de aguas lluvias en parqueadero de vehículos área de edificio Casablanca.



Fuente propia, visita de campo Compas Cartagena, 2023.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

7.3.1 Medidas de adaptación

Tabla 52.

Requerimientos en capacidad adaptativa de acuerdo a evaluación de vulnerabilidad VuCE.

Amenaza	Impacto	Medida de adaptación	Prioridad
	Deterioro de la infraestructura	Recubrimiento de techos con tejados o revestimientos resistentes al calor y aislantes térmicos, tales como: tejas de arcilla o cerámica, hormigón, metal reflectante, techos verdes u otros.	BAJA
Altas Temp.	Ampliación de tiempo en operaciones por requerimiento de pausas del personal	Adaptar y fortalecer el plan de trabajo y descanso, considerando las alertas de olas de calor, con tareas físicas demandantes en horarios más frescos y siguiendo las recomendaciones de la OIT y los protocolos de emergencia.	MEDIA
	Afectación de la calidad de graneles	Establecimiento de un PON para el manejo de mercancías a granel, especialmente alimentos, que contempla su categorización por tipo y aborda las fluctuaciones tanto de humedad como de temperatura.	ALTA
	Golpe de calor	Inclusión de cláusulas detalladas y claras en las pólizas existentes, que garanticen la cobertura de afectación de graneles por condiciones climáticas.	ALTA
Lluvias	Interrupción carga y descarga	Incorporación de medición del estrés térmico en el trabajo Revisar y fortalecer los planes de evacuación y continuidad operativa de acuerdo con el Plan de Operaciones de Emergencia (PON) y las directrices establecidas en el RTO (Identificar riesgos y evaluar efectividad de los procedimientos).	ALTA
	Deterioro granel	Intensificar los mantenimientos preventivos del actual sistema de impermeabilización en techos y paredes en silos, según guía de soluciones de Zika, con el fin de prevenir la humedad.	ALTA
Lluvias fuertes	Inundación parcial patios, muelles, estacionamientos de edificios, infiltración en edificios	Acondicionamiento de la infraestructura o de los bienes que son vulnerable a las inundaciones, en particular infraestructura crítica como el patio 6.	ALTA

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Amenaza	Impacto	Medida de adaptación	Prioridad
		Adoptar medidas de mejora en el sistema de drenaje o crear diseño de desagüe inteligente. Elevación de la superficie a 1,2 m sobre el nivel del mar, mejoramiento de obras de drenaje de área del Patio 6. Revisar, actualizar y fortalecer los planes de evacuación y continuidad operativa de acuerdo con el Plan de Operaciones de Emergencia (PON) y las directrices establecidas en el RTO (Identificar riesgos y evaluar efectividad de los procedimientos). Evitar tránsito de equipos pesados en costado norte del Patio 6.	ALTA
	Interrupción de operaciones, en bodegas 2, 3 y 4.		
	Retrasos en aproximación y atraque de motonaves.	Lista de verificación de seguridad del sitio y de su infraestructura y planes para evaluar los daños que quedan después de un fenómeno extremo.	BAJA
	Deterioro infraestructura.	Mejorar sistemas de drenaje y diseñar desagües inteligentes. Adecuación/ Ampliación de los canales de aguas lluvias en silos. Reemplazo de láminas de fibrocemento en techos por materiales más resistentes.	ALTA
	Retrasos en aproximación y atraque de motonaves.	Mantener un seguimiento constante de las condiciones meteorológicas para anticipar posibles eventos climáticos adversos y mantener horarios flexibles como medida de contingencia (Planeación anticipada).	BAJA
Lluvia extrema			
	Daños en carga general	Asegurar la carga y manipulación de mercancías vulnerables mediante la inclusión de cláusulas especificadas en las pólizas de seguros, garantizando una cobertura adecuada ante condiciones climáticas extremas. Carga dispuesta en áreas elevadas y bien drenadas en el puerto.	BAJA
	Peligro caídas, reducción visibilidad, maniobrabilidad vehículos	Fortalecer la capacidad de adaptación mediante la incorporación de simulacros del Procedimiento Operativo Normalizado de Emergencia por fenómenos naturales, conforme al anexo del RTO - Reglamento de Condiciones Técnicas de Operación Portuaria.	ALTA

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Amenaza	Impacto	Medida de adaptación	Prioridad
		Lista de verificación de seguridad del sitio y de su infraestructura y formatos para evaluar los daños que quedan después de un fenómeno extremo.	
		Mantener registros de mantenimiento preventivo y correctivo de daños causados por el viento.	
		Desarrollar planes o sistemas de precaución y alertas tempranas.	
	Daños a la infraestructura (techos, paredes u otros).	Programar actualizaciones periódicas del diseño estructural según las normativas y tecnologías más recientes.	MEDIA
Ráfagas de viento		Considerar la aplicación de mejoras en materiales y métodos de construcción en futuras renovaciones.	
		Modificar prácticas de trabajo durante vientos extremos.	
	Detención de operaciones, riesgo actividades de carga/descarga.	Revisar, actualizar y fortalecer los planes de evacuación y continuidad operativa de acuerdo con el Plan de Operaciones de Emergencia (PON) y las directrices establecidas en el RTO (Identificar riesgos y evaluar efectividad de los procedimientos).	ALTA
	Riesgos a la seguridad de los operarios.	Garantizar que las grúas Liebherr estén equipadas con alarmas de viento que advierten al operador si el viento está demasiado fuerte para operar con seguridad.	ALTA
	Socavación de muro perimetral.	Recubrimiento y reforzamiento de estructuras ya existentes.	MEDIA
	Afectación del muro perimetral por oleaje antrópico.	Realizar estudios de morfología de la plataforma continental junto con perfiles batimétricos de alta resolución.	MEDIA
Ascenso del Nivel del Mar	Inhabilitación de área nororiental de patio 6 por acumulación de aguas lluvias.	Elevación y adecuación de sistemas de drenaje.	
		Actualización de los planos del sistema de drenaje, incorporando las alturas o cotas con respecto al nivel del mar.	
	Inundación marina del patio 6, Pérdida de capacidad de soporte de suelo.	En colaboración con la Dirección General Marítima (DIMAR) y las autoridades ambientales y territoriales correspondientes, llevar a cabo estudios de ingeniería geotécnica destinados a supervisar la estabilidad del lecho marino en la bahía de Cartagena.	ALTA

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Amenaza	Impacto	Medida de adaptación	Prioridad
		Reforestación y recuperación del manglar, como barrera protectora. Evitar la expansión del puerto hacia áreas muy bajas.	
	Afectación y retrasos en la navegación y atraque de motonaves.	Adquisición software de modelización hidrológica, como WEAP, para conocer el comportamiento del nivel del mar, oleaje, entre otros.	BAJA
	Afectación del relacionamiento con comunidades de influencia directa, por tránsito de embarcaciones.	Plan estratégico para la comunicación directa con la comunidad del área de influencia, para el control y monitoreo del oleaje generado por tránsito de embarcaciones en diques o canales sensibles.	BAJA
	Daño equipos de izaje. Daño en infraestructura y generadores eléctricos	Estudio para la ampliación de los sistemas de pararrayos y sistemas de puesta a tierra actuales.	MEDIA
Descarga eléctrica	Interrupción de operaciones.	Adquisición detector de tormentas.	ALTA
	Daños en carga general	Evaluar y garantizar las condiciones de aseguramiento establecidas en las pólizas existentes.	ALTA
	Quemaduras, descarga eléctrica, fatalidad	Creación de un procedimiento operativo normalizado (PON) y plan de emergencia relacionado a las condiciones de seguridad durante tormentas eléctricas.	ALTA

Fuente. Elaboración propia. Nota: Las medidas de adaptación planteadas se clasifican según la prioridad arrojada en el cálculo del índice VuCE, anteriormente relacionado para cada riesgo.

8 PLAN DE INTERVENCIÓN

Tabla 53

Plan de intervención

Amenaza Aspecto	Medida De Adaptación	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4				Costo Aproximad o COP	Indicador
		Trimestre				Trimestre				Trimestre				Trimestre					
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Planeación estratégica	Incluir responsabilidades relacionadas con la gestión del cambio climático en el manual de funciones en los diferentes niveles jerárquicos de la organización, alineados con los objetivos de sostenibilidad y resiliencia climática.																	NA	Porcentaje de puestos con responsabilidades de gestión del cambio climático Integradas en el Manual de Funciones en la Organización.
	Inclusión de cláusulas específicas en los contratos de adquisiciones que establezcan requisitos de resiliencia climática.																	NA	Porcentaje de Contratos de Adquisiciones que Contienen Cláusulas Específicas Estableciendo Requisitos de Resiliencia Climática.
	Alineación de la estrategia de cambio climático y sostenibilidad con las políticas nacionales e instrumentos de planeación territorial.																	NA	Porcentaje de recursos asignados a la implementación de la estrategia provenientes de fuentes nacionales o territoriales.
	Diseñar un Sistema de Información y Comunicación (SIC) que busque estandarizar los reportes de novedades en infraestructura, operación, carga y personal del puerto, relacionado a condiciones																	50.000.00 0	Sistema de Información y Comunicación (SIC) de novedades operativas por condiciones climáticas, diseñado, implementado y monitoreado.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

	climáticas, que permita la visualización, análisis de datos y la toma de decisiones.			
	Diagnóstico del estado actual de cubiertas para el diseño de recubrimiento con materiales resistentes al calor y/o aislantes térmicos.	30.000.000	Proyecto de ingeniería diseñado y presupuestado.	
	Establecimiento de un PON para el manejo de mercancías a granel, especialmente alimentos, que contempla su categorización por tipo y aborda las fluctuaciones tanto de humedad como de temperatura.	15.000.000	Documento desarrollado y socializado	
Alta Temperatura	Inclusión de cláusulas detalladas y claras en las pólizas existentes, que garanticen la cobertura de afectación de graneles por condiciones climáticas extremas.	NA	Número de cláusulas relacionadas a la cobertura de graneles por condiciones climáticas.	
	Diseñar un plan de trabajo seguro ante olas de calor, siguiendo las recomendaciones de la OIT y midiendo el estrés térmico en el trabajo.	12.000.000	Porcentaje de trabajadores que cumplen con el plan de trabajo y descanso reforzado.	
	Diseño y siembra de senderos arbóreos al interior de la instalación portuaria	8.000.000	Número de plántulas sembradas.	
	Diseño, construcción e implementación de sistema de rociadores con microgotas	150.000.000	Sistema de rociadores con microgotas diseñado, construido e implementado.	
Lluvias Extremas	Estudio de ingeniería para el mejoramiento de sistemas de drenaje y diseño de desagües inteligentes.	50.000.000	Proyecto de ingeniería diseñado y presupuestado.	

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

	Diseñar planes de evacuación y continuidad operativa, conforme al Plan de Operaciones de Emergencia (PON), de acuerdo con lo establecido en el Régimen de Tiempo de Operación (RTO), que contemplen la socialización y la realización de simulacros.		15.000.000	Documento desarrollado y socializado
	Asegurar la carga y manipulación de mercancías vulnerables mediante la inclusión de cláusulas especificadas en las pólizas de seguros, garantizando una cobertura adecuada ante condiciones climáticas extremas.		15.000.000	Número de cláusulas relacionadas a la cobertura de graneles por condiciones climáticas.
	Actualizar guías para futuros diseños y/o procesos de remodelación de infraestructura, considerando aspectos climáticos.		10.000.000	guía diseñada, implementada y monitoreada.
Ráfagas de Viento	Diseñar planes de precaución y alertas tempranas, que garantice que las grúas Liebherr estén equipadas con alarmas de viento que advierten al operador si el viento está demasiado fuerte para operar con seguridad.		15.000.000	Grúas con alarmas de vientos.
Ascenso del Nivel del Mar	Estudio de viabilidad técnica y financiera para la elevación de la superficie del patio 6 a 1,2 m sobre el nivel del mar.		80.000.000	Estudio de viabilidad realizado.
	Diagnóstico de las condiciones de infraestructura de enrocados y muros de contención.		70.000.000	Áreas de estructuras de protección del muelle reforzadas.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Descarga Eléctrica	Diagnóstico y estudio técnico para ampliar el sistema de apantallamiento existente, cubriendo áreas adicionales e instalando pararrayos y sistemas de puesta a tierra.				40.000.000	Diagnóstico realizado
	Creación de un procedimiento operativo normalizado (PON) y plan de emergencia relacionado a las condiciones de seguridad durante tormentas eléctricas.				15.000.000	Documento desarrollado y socializado

Fuente. Elaboración propia

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

La conclusión de esta investigación destaca la significativa contribución obtenida a través de un análisis profundo del índice de vulnerabilidad al cambio climático del puerto Compas Cartagena. Al alcanzar los objetivos establecidos, se ha logrado una comprensión valiosa de la complejidad y los desafíos inherentes al cambio climático en el entorno portuario.

Este estudio permitió dar respuesta a la pregunta de investigación: "¿Cuál es el grado de vulnerabilidad frente al cambio climático del puerto de Compas Cartagena y las posibles medidas de adaptación que requiere para mantener un funcionamiento eficiente del puerto?". La evaluación detallada de variables meteorológicas y factores internos ha revelado un panorama claro de las amenazas climáticas y su impacto en el puerto.

El análisis de la vulnerabilidad del puerto de Compas Cartagena se desarrolló con base en la metodología del Plan de gestión del cambio climático para los puertos marítimos de Colombia, acorde a los conceptos de la norma NTC-ISO 14091 y la descripción de vulnerabilidad del informe AR4 del IPCC para formular medidas de adaptación del sistema portuario ante las amenazas y escenarios presentes y futuros del cambio climático.

En términos de grado de vulnerabilidad, se ha identificado que el ascenso del nivel del mar, altas temperaturas, vientos fuertes, lluvias intensas y descargas eléctricas representan riesgos significativos para la operación, infraestructura, integridad de la carga y seguridad del personal del puerto. Esta identificación de vulnerabilidades proporciona una base sólida para el

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

desarrollo de estrategias adaptativas específicas y efectivas basadas en la identificación de los aspectos que permiten que cada componente del sistema portuario tenga mayor capacidad de adaptación para afrontar los desafíos que imponen las amenazas identificadas derivadas de la variabilidad y cambio climático.

En respuesta los resultados del cálculo del índice de riesgo empresarial (IRCE) y el índice de vulnerabilidad climático empresarial VuCE, se pueden conocer los impactos potenciales que se pueden materializar ante las amenazas meteorológicas, variabilidad y cambio climático, estimar la capacidad adaptativa de cada parte del sistema portuario y finalmente hallar la vulnerabilidad existente con el propósito de formular medidas de adaptación que permitan aumentar la resiliencia y reducir finalmente la vulnerabilidad.

Las medidas planteadas abarcan los planes de mejoramiento de la infraestructura, de los procedimientos operativos, para la protección de la carga y de las personas que hacen parte de Compas Cartagena, así como el involucramiento de las comunidades para el cuidado y buen relacionamiento en temas de beneficio común. Estas medidas se basan en la innovación y optimización de recursos en temas de eficiencia de uso de áreas, uso energético, protección de las cargas de graneles, contenedores y acero ajustándose a las necesidades específicas del puerto. La clasificación y priorización de estas medidas se basan en la calificación IRCE para una implementación efectiva y focalizada en los aspectos más de mayor importancia para el puerto.

En conclusión, este estudio no solo ha delineado el grado de vulnerabilidad del puerto de Compas Cartagena ante las amenazas meteorológicas, También proporciona un plan para adaptarse al cambio climático que permitirá al puerto ser más resistente y establecer una norma para gestionar los riesgos climáticos en las operaciones portuarias.

9.2 Recomendaciones

1. Se sugiere implementar un sistema de registro detallado de interrupciones operativas y afectaciones a la infraestructura debido a condiciones climáticas adversas. Esto fortalecerá la disponibilidad de información histórica crítica para la toma de decisiones informadas.
2. Es necesario realizar un análisis de las causas de la socavación o erosión de las estructuras de protección del muelle para una comprensión más profunda de este fenómeno, para formular barreras de protección reducción del impacto.
3. Se recomienda mejorar la comunicación interna entorno a procedimientos y medidas que permitan reducir el impacto de las amenazas, fortalecer la participación comunitaria y considerar medidas de adaptación en la estrategia de la empresa en relación con el cambio climático.
4. Incluir de manera explícita dentro de los protocolos operativos, de seguridad, salud en el trabajo existentes y en los Planes Operativos Normalizados (PON), Las condiciones específicas y acciones preventivas, cese de operaciones y ocurrencia de incidentes o accidentes debido a condiciones de meteorológicas adversas en caso de lluvias, ráfagas de viento, visibilidad limitada, inundaciones, tormenta eléctrica o cualquier otro fenómeno asociado. Estos protocolos deben ser difundidos y conocidos por todo el personal que labora en los puertos de Compas.
5. Asignar un presupuesto específico para la implementación de medidas de adaptación al cambio climático, garantizando recursos adecuados.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

6. Se recomienda que Compas Cartagena se certifique en la norma NTC-ISO 14091 con el cual la evaluación de la vulnerabilidad y los riesgos asociados al cambio climáticos de manera continua y estructurada lo que permite fortalecer su sistema y la capacidad adaptativa ante los fenómenos meteorológicos, así como continuar siendo una organización líder en la sostenibilidad y referente en la industria portuaria.
 7. Es recomendable establecer un plan de trabajo de obras que permitan la evacuación de las aguas lluvias que se acumulan en el Patio 6 a través de canales de conducción y separación de sólidos antes de vertimiento de aguas, a un corto plazo evitando las restricciones de tránsito, demora en las operaciones e impidiendo la afectación de cargas y daño de equipos. Realice un estudio hidráulico de obras que permitan la evacuación efectiva de las aguas lluvias y el desarrollo continuado y normalizado de las áreas de circulación y almacenamiento de cargas.
 8. Se recomienda actualizar el análisis de vulnerabilidad del puerto Compas Cartagena por lo menos cada 3 a 5 años, incorporando las variables que de acuerdo con los registros tengan mayor impacto en los componentes del sistema portuario.
 9. Se recomienda hacer un nuevo análisis de vulnerabilidad y riesgo ante el cambio climático y medidas de adaptación al menos cada 10 años, considerando el plan estratégico de Compas y los requerimientos de acción nacionales e internacionales para asegurar el sector por las condiciones del cambio climático.
 10. Es esencial ampliar la cobertura de las pólizas y seguros para incluir daños a equipos, infraestructura u operaciones debidos a variables climáticas, más allá de la descarga eléctrica.
-

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

11. Se recomienda implementar un sistema de monitoreo en tiempo real o alertas tempranas ante amenazas climáticas que puedan impactar la salud humana, los equipos y operaciones portuarias.
12. Articulación sectorial, participación y alineación con los planes de acción establecidos en instrumentos de planeación cruciales tales como: Documento CONPES 4118 de 2023, planes de desarrollo municipal, el PIGCC-4C y el recién actualizado POT, que involucran ejes estratégicos, programas y proyectos para el fortalecimiento del sector portuario y medidas de adaptación al cambio climático.
13. Evaluar posibles accesos a fondos de cooperación internacional para financiar proyectos de adaptación.
14. Intensificar los mantenimientos preventivos del actual sistema de impermeabilización en techos y paredes en silos, según guía de soluciones de Zika.
15. Implementar Lista de verificación de seguridad del sitio y de su infraestructura y planes para evaluar los daños que quedan después de un fenómeno extremo, incluido en los PON de emergencia.
16. Gestión interinstitucional para la realización de estudios de morfología de la plataforma continental junto con perfiles batimétricos de alta resolución.
17. Diseño e implementación de un plan estratégico para la comunicación directa con la comunidad del área de influencia, para el control y monitoreo del oleaje generado por tránsito de embarcaciones en diques o canales sensibles.

10 REFERENCIAS

(AGO), A. G. (2006). *Climate Change Impacts and Risk Management: A Guide for Business and Government*, Report, Broadleaf International & Marsden Jacobs Associates for the Australian Greenhouse Office, Canberra. .

Alcaldía Mayor de Cartagena, Minambiente; Invemar, Camara de comercio de Cartagena; Alianza Clima Desarrollo. (07 de 2014). *Plan 4C Cartagena competitiva y compatible con el clima*. Obtenido de <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/plan-4c-cartagena-de-indias-competitiva-y-compatible-con-el-clima-resumen-ejecutivo.pdf>

Arbulú Baquedano, B. (2002). *Cambio climático global (Calentamiento Global)*. Chiclayo , Perú.

Armenta, G. E., & Ruiz, J. F. (s.f.). *Indicadores de eventos extremos en los escenarios de cambio climático para el periodo 2011-2040*. Recuperado el 27 de 11 de 2023, de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Eventos+Extremos+2011-2040+%28Ruiz+y+Armenta%29.pdf/50244c83-7d5c-4e77-8fed-5df34f700189>

Becker, A. M. (2013). A Note on Climate Change Adaptation for Seaports: A Challenge for Global Ports, a Challenge for Global Society . *Climatic Change* 120(4): 683-695.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Becker, A. N. (2018). Implications of climate change for shipping: Ports and supply chains.

Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change: e508. doi: 10.1002/wcc.508.

Cardona, O. D., van Aalst, M., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., . . . Tan Sinh, B. (2012). *IPCC. Determinants of Risk Exposure and Vulnerability. Managing the risks of the extreme events and disasters to advance climate change adaptation.* Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/determinants-of-risk-exposure-and-vulnerability/>

CEN. (2023). *Integrated Climate Data Center ICDC.* Obtenido de <https://www.cen.uni-hamburg.de/icdc/data/ocean/ssh-aviso.html>

Centro ambiental de Cartagena de Indias. (2019). *Bahía interna de Cartagena.* Obtenido de Generalidades: Generalidades – Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. (2019). [Epacartagena.gov.co. https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/ecosistemas/lagunas-y-cuerpos-de-agua-internos/bahia-interna-de-cartagena/generalidades/](https://epacartagena.gov.co)

CEPAL. (2020). *Informe de Actividad Portuaria de América Latina y el Caribe.*

CEPAL, & Magrin, G. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe.* Obtenido de https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/39842/S1501318_es.pdf

CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, Dimar. (10 de 2020). *Información general de Barranquilla.* Obtenido de https://www.cioh.org.co/images/site/principales_puertos/pdf/9_BARRANQUILLA.pdf

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Dimar. (10 de
2020). *Información general de Cartagena*. Obtenido de

https://www.cioh.org.co/images/site/principales_puertos/pdf/4_CARTAGENA.pdf

Clarkson. (2020). *Seaborne Trade Monitor*. Volume 7, No. 8.

Climate Central. (2021). *Coastal risk screening tool*. Recuperado el 26 de 12 de 2023, de

<https://coastal.climatecentral.org/es/map/14/->

[75.529/10.4129/?theme=sea_level_rise&map_type=year&basemap=roadmap&contiguouss=true&elevation_model=best_available&forecast_year=2040&pathway=ssp3rcp70&percentile=p50&refresh=true&return_level=return_level_1&rl](https://coastal.climatecentral.org/es/map/14/-75.529/10.4129/?theme=sea_level_rise&map_type=year&basemap=roadmap&contiguouss=true&elevation_model=best_available&forecast_year=2040&pathway=ssp3rcp70&percentile=p50&refresh=true&return_level=return_level_1&rl)

Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-021-98428-4.pdf>

COMPAS. (17 de 05 de 2016). *Levantamiento topográfico de vigas de confinamiento del*

Terminal Compas. Cartagena-Bolivar. Informe interno no publicado. Recuperado el 11
de 11 de 2023

COMPAS. (2021). *Informe de Gestión*. Obtenido de

<https://www.compas.com.co/Portals/0/contenidos->

[compas/sostenibilidad/Compas_Informe_de_gestion_2021.pdf](https://www.compas.com.co/Portals/0/contenidos-compas/sostenibilidad/Compas_Informe_de_gestion_2021.pdf)

Compas. (25 de 02 de 2023). *Compañía de puertos Asociados*. Obtenido de

www.compas.com.co

COMPAS. (2023). *COMPAS.COM.CO*. Recuperado el 1 de 11 de 2023, de

<https://www.compas.com.co/Portals/0/contenidos->

[compas/sostenibilidad/COMPAS_Informe-de-gestion-2022.pdf](https://www.compas.com.co/Portals/0/contenidos-compas/sostenibilidad/COMPAS_Informe-de-gestion-2022.pdf)

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

COMPAS. (2023). Quienes somos. Obtenido de <https://www.compas.com.co/es/quienes-somos>

Conejo, J. (22 de 12 de 2023). Control de calidad graneles Compas Cartagena. (J. Ramirez,
Entrevistador)

Dancho, M., & Vaughan, D. (2023). *Timetk: A Tool Kit for Working with Time Series*. R package
version 2.8.4. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/timetk/index.html>

Deutsche Gesellschaft fur internationale Zusammerinarbit GIZ GmbH. (08 de 2014). Obtenido
de [https://www.adaptationcommunity.net/download/va/vulnerability-guides-manuals-
reports/vuln_source_2017_EN.pdf](https://www.adaptationcommunity.net/download/va/vulnerability-guides-manuals-reports/vuln_source_2017_EN.pdf)

DIMAR. (2023). *Serie de datos de nivel del mar con control de calidad obtenidos mediante
estación mareografica ubicada en la Isla Manzanillo, Cartagena, Colombia. 2013-2020*.
Centro Colombiano de Datos, Bolivar, Cartagena. Obtenido de
<https://cecoldo.dimar.mil.co>

EPA Cartagena. (2019). *Observatorios EPA Cartagena*. Recuperado el 30 de 10 de 2023, de
[https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-
urbano/precipitacion/#:~:text=El%20clima%20de%20Cartagena%20presenta,transici%C
3%B3n%20donde%20se%20presentan%20lluvias](https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/precipitacion/#:~:text=El%20clima%20de%20Cartagena%20presenta,transici%C3%B3n%20donde%20se%20presentan%20lluvias)

Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590061719300171?via%3Dihub>

Fakhruddin, B. (2020). Integrated decision-making framework for climate change adaptation in
coastal areas. *Ocean & Coastal Management*. 192.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

FCCC. (2022). , *Convencion Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. WMO
Provisional State of the Global Climate*. Recuperado el 18 de 04 de 2023, de

https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11359

Fonseca, C. H. (2021). La industria portuaria y su permanente reto de cambio (segunda parte).

ANDI. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/17154-la-industria-portuaria-y-su-permanente>

Fuentes Padilla, G. C., & Pretel Palacios, Z. (2021). Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el Puerto Compas Tolú. (*Tesis de Maestría*).

Universidad EAN, Bogotá D.C.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Primera edición ed.).

ICONTEC . (06 de 12 de 2021). *NTC-ISO 14091:2021. Adaptación al cambio climático*.

Directrices sobre la vulnerabilidad, los impactos y la evaluación del riesgo. Obtenido de <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-iso-adaptacion-al-cambio-climatico-directrices-sobre-la-vulnerabilidad-los-impactos-y-la-evaluacion-del-riesgo-ntc-iso14091-2021.html>

ICONTEC. (16 de 12 de 2021). *NTC-ISO 14091. Adaptación al cambio climático. Directrices*

sobre la vulnerabilidad, los impactos y la evaluacion del riesgo. Obtenido de <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-iso-adaptacion-al-cambio-climatico-directrices-sobre-la-vulnerabilidad-los-impactos-y-la-evaluacion-del-riesgo-ntc-iso14091-2021.html>

IDEAM - UNAL. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia. (*Vols. SBN: 978-958-8067-97-1*). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - IDEAM.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

IDEAM. (10 de 2011). *Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística*. Recuperado el 1 de 10 de 2023, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Clim%C3%A1tico+en+Colombia+con+base+en+informaci%C3%B3n+estad%C3%ADstica.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>

IDEAM. (10 de 12 de 2012). *IDEAM*. Obtenido de

http://www.ideam.gov.co/documents/21021/93551503/12_IFN_10_DIC_2012.pdf/c68c4b75-f46a-4fb7-b649-109582abf7e2?version=1.0

IDEAM. (03 de 2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100*.

Obtenido de

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Escenarios+Cambio+Climatico+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/fe5d64fb-3a82-4909-a861-7b783d0691cb>

IDEAM. (2017). *Atlas Climatológico de Colombia*. Obtenido de

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023777/023777.html>

IDEAM. (2017). *ideam.gov.co*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia. Recuperado el 05 de 10 de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atlas>

IDEAM. (12 de 12 de 2023). *ideam.gov.co*. Recuperado el 01 de 11 de 2023, de Consulta y

descarga de datos hidrometeorologicos: temperatura del aire, lluvia, velocidad del viento:
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

IDEAM UPME. (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Obtenido de
http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf

IDEAM, & Cadena, M. C. (2012). *NIVEL DEL MAR Y RÉGIMEN DE MAREA EN LAS ESTACIONES MAREOGRÁFICAS DE COLOMBIA*. Obtenido de
<http://ideam.gov.co/documents/21021/23877/Caracteristicas+Mareas.pdf/55110c0b-9bd6-4c97-ab2e-c99807e3fc01>

IDEAM, UPME. (2017). *Altas del viento de Colombia*. Recuperado el 200, de
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023776/023776.html>

INVEMAR. (2003). *Programa Holandés de Asistencia para estudios en Cambio Climático: Colombia. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana y medidas de adaptación*. Santa Marta. Obtenido de
http://www.invemar.org.co/documents/67592/119095/JA-35_V1.pdf/888e6083-978e-44e5-8766-b879ba10794a

INVEMAR, The Netherlands Climate Assistance Programme NCAP; ETC Group; Stockholm Institute; MADS. (2008). *Coastal Adaption. Building capacity in two vulnerable points of the Colombian coastal area*. Obtenido de
http://climares.invemar.org.co/documents/34346/40427/FinalTechRepNCAP_Colombia11Sep08.pdf/23757ef5-f103-bdc7-ba02-4bca363f012c?t=1562696345320

IPCC. (2007). *AR4 Climate change 2007. The Physical Science Basis*. Obtenido de
<https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/#report-chapters>

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge University Press.

Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>

IPCC. (2007). *Fourth Assessment report AR4*. (C. U. Press, Ed.) Obtenido de Climate Change

2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability:

https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.html

IPCC. (2007). *Fourth Assessment Report: Climate change 2007. Glossary. Working Group 2.*

Appendix I. Recuperado el 15 de 10 de 2023, de

www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_appendix.pdf

IPCC. (2013). Fifth Assessment Report AR5 Physical basis. Contribución del Grupo de trabajo I

al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el
Cambio Climático. Obtenido de

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf

IPCC. (2018). bre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles
preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones
mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la
respuesta. 73-94.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working
Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate
Change.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

IPCC. (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

Climate Change. United Kingdom and New York. Obtenido de

https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

IPCC. (6 de 2022). *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press. Obtenido de

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf

Juan C. Restrepo 1Diana Franco, J. E. (2013). Bahía de Cartagena (Colombia): distribución de sedimentos superficiales y ambientes sedimentarios.

Juan Gabriel Reuda Bayona, e. a. (2013). Caracterización hidrodinámica en un estuario tropical de sudamerica con régimen micro-mareal mixto (Bahia de Cartagena, Colombia).

L. Schipper, M. P. (2006). Disaster risk, climate change and international development: scope for, and challenges to, integration. *Disasters. The Journal of Disaster Studies, Policy and Management*.

Lacambra, C. V., Lozano, C. D., Alonso, D., & Fontalvo, M. L. (2003). *Amenazas naturales y antrópicas en las zonas costeras Colombianas*. Obtenido de INVEMAR:

[https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2018/12/Amenazas-](https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2018/12/Amenazas-Naturales-y-Antr%C3%B3picas-en-las-Zonas-Costeras-Colombianas.pdf)

[Naturales-y-Antr%C3%B3picas-en-las-Zonas-Costeras-Colombianas.pdf](https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2018/12/Amenazas-Naturales-y-Antr%C3%B3picas-en-las-Zonas-Costeras-Colombianas.pdf)

MADS, Invenmar, Mintransporte. (2016). *Plan de gestión del cambio Climático para los puertos maritimos de Colombia*. Bogotá. Obtenido de

https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/Plan_CC_Puertos_version_trabajo.pdf

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Málikov, Í., & IDEAM. (11 de 2010). *ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS DEL NIVEL DEL MAR*

A NIVEL LOCAL Y SU RELACIÓN CON LAS TENDENCIAS MOSTRADAS POR LOS

MODELOS INTERNACIONALES. Bogotá DC. Obtenido de

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/TENDENCIAS+DEL+NIVEL+DEL+MAR.pdf/2fc812e5-d4e4-4628-ac61-a5b34aa500f1>

Margarita Pery, R. N., & editor, J. C. (2021). Riesgo climático y puertos: Guía práctica sobre fortalecimiento de la resiliencia. *BID: Invest*.

McEvoy D, M. J. (2013). Enhancing the resilience of seaports to a changing climate: research synthesis and implications for policy and practice. . *Gold Coast, Australia: National Climate Change Adaptation Research Facility*.

Meteorológica Mundial, O. (2007). *Meteorología polar Comprender los efectos a escala mundial*. Obtenido de <http://www.Firstpeople.US>

Ministeria de Transporte. (2023). *Boletín Estadístico Tráfico Portuario en Colombia, año 2022*. Bogotá: Supertransporte.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Obtenido de

https://www.ani.gov.co/sites/default/files/u789/plan_cambio_climatico_puertos.pdf

Ministerio de trabajo, migraciones y seguridad social. (2019). *Exposición laboral a estrés térmico por calor y sus efectos en al salud. ¿Qué hay que saber?* Recuperado el 14 de 09 de 2023, de <https://istas.net/sites/default/files/2019-04/Guia%20EstresTermico%20por%20exposicion%20a%20calor.pdf>

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Molares Babra, R. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Boletín científico 22 CIOH*.

Naciones Unidas. (2022). *Informe del transporte marítimo 2022*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo.

National Prediction Center. (2022). *The heat index equation*. Recuperado el 7 de 12 de 2023, de https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml

NOAA. (2022). *Heat index equation*. Obtenido de https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml

NOAA. (2023). *El Niño- Southern Oscillation ENSO*. Obtenido de <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>

NOAA. (2023). *National Centers for Environmental Information*. Recuperado el 11 de 11 de 2023, de <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>

Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (Vol. 1). Ginebra: Presidente de la junta de publicaciones Organización Meteorológica Mundial (OMM). Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027

Pallmall, A. O. (2021). *El cambio climático, una amenaza global*. Ediciones Alfar.

Pielke, R. (s.f.). *WHAT IS CLIMATE CHANGE?* Obtenido de <http://www.unep.ch/ipcc/pub/sarsy>

Posada, P. B. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. *INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta, 200 páginas*.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Quintana, E. (26 de 12 de 2023). Descripción de operaciones contenedores y carga general. (J. R. Molina, Entrevistador)

Rangel Buitrago, N. G.-P. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas sig y métodos multicriterio.

Restrepo Ángel, J. D., Mora Páez, H., Díaz, F., Govorcín, M., Wdowinski, S., Giraldo Londoño, L., . . . Duque Trujillo, J. F. (23 de 09 de 2021). *Coastal subsidence increases vulnerability to sea level rise over twenty century in Cartagena, Caribbean Colombia*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-021-98428-4#:~:text=We%20find%20that%20geologically%20induced,and%20225%20mm%20by%202100.>

Rincón, H. (19 de 12 de 2023). Descripción del manejo y conservación de graneles. (H. Rincón, Entrevistador)

RMIT University. (2013). *Climate change adaptation guidelines for ports*. Australia.

Rothfus, L. (7 de 1 de 90). *The Heat Index "Equation" (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index)*. Obtenido de https://www.weather.gov/media/ffc/ta_htindx.PDF

Sánchez, L., & Reyes, O. (2015). *Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y Caribe*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39781-medidas-adaptacion-mitigacion-frente-al-cambio-climatico-america-latina-caribe>

Sánchez, R. &. (2021). Logística internacional pospandemia: Análisis de las industrias aérea y de transporte marítimo de contenedores. *Comercio Internacional*.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2023). Mapa de amenaza sísmica de Colombia.

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

Soto, J. (26 de 6 de 2020). *Índice de Sensación Térmica "Heat Index"*. Recuperado el 10 de 11 de 2023, de <https://clima.bio/indice-de-sensacion-termica-heat-index/>

Supertransporte. (2023). *Boletín estadístico del Tráfico Portuario, año 2022*. Bogota.

The Economist. (2020). Ports are highly exposed to climate change and often ill-prepared.

Tiempo, E., Clima, E., Hídricos, S., & Alcance De Todos, A. (s.f.). *El tiempo, el clima y los servicios hídricos al alcance de todos*. Obtenido de www.wmo.int

UNCTAD. (22 de 04 de 2020). *Conferencia de comercio y desarrollo de Naciones Unidas*. Recuperado el 25 de 02 de 2023, de https://unctad.org/system/files/official-document/cimem7d23_es.pdf

United Nations. (1992). *UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE UNITED NATIONS*. Obtenido de https://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/press_factsh_science.pdf

Vaisala. (2024). *Vaisala lightning 2016-2023*. Recuperado el 25 de 01 de 2024, de <https://interactive-lightning-map.vaisala.com/>

Obtenido de

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4750/MAE_EDUC_GE_2002.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Vargas Franco, V. (2007). *Estadística descriptiva para Ingeniería Ambiental con SPSS*. Cali. Obtenido de <https://bit.ly/3HD1PM6>

Wolfgang, E. (5 de 12 de 2023). Consulta velocidad max de viento operativa segura LHM 550. Barranquilla. Obtenido de elmar.wolfgang@liebherr.com

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

World Meteorological Organization, W. (s.f.). *Climate Knowledge for Action: A global framework for climate services.*

World Meteorological Organization. (2022). *State of the Climate in Latin America and the Caribbean* (Vols. WMO-No 1295). Geneva: Chair, publications board WMO. Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11270

World Meteorological Organization, W. (s.f.). *International glossary of hydrology = Glossaire international d'hydrologie = Mezhdunarodnyĭ gidrologicheskiĭ slovar' = Glosario hidrológico internacional.*

World Meteorological Organization. (s.f.). *The global climate 2001-2010 : a decade of climate extremes : summary report.*

World Meteorological Organization (Institution/Organization). (1992). *International meteorological Vocabulary.*

ANEXO 1. Encuesta realizada.

1. Correo electrónico:

DATOS BÁSICOS DEL ENCUESTADO

2. Cargo que ocupa:

3. Tipo de cargo (única opción):

a. Operativo

b. Directivo

c. Administrativo

5. ¿A cuál proceso pertenece dentro del esquema organizacional? [Si su área laboral no aparece las opciones, escoja otra]

4. Años de antigüedad en COMPAS:

5. ¿A cuál proceso pertenece dentro del esquema organizacional? [Si su área laboral no aparece en las opciones, escoja otra]

a. Gerencia

b. Planeación estratégica

c. Infraestructura portuaria

d. Sostenibilidad Operacional

e. HSE

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- f. Financiero
- g. Comercial
- h. Gestión Humana
- i. Otra

IDENTIFICACIÓN DE LAS AMENAZAS CLIMÁTICAS

6. ¿Considera usted que las siguientes variables/fenómenos climáticos son una amenaza a la operación/infraestructura del puerto? [Califique cada amenaza escogiendo definitivamente no, probablemente no, indeciso, probablemente si o definitivamente si]
- a. Variación nivel del mar (inundación portuaria)
 - b. Erosión/socavación de márgenes del puerto Inundación por lluvia (pluvial)
 - c. Vendaval (ráfagas de viento)
 - d. Sismos Tormenta (descarga eléctrica)
 - e. Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)
7. ¿Cuáles considera que son las amenazas climáticas que afectan las siguientes áreas del puerto? [Selección múltiple] Opciones: Variación nivel del mar (inundación portuaria), Erosión/socavación de márgenes del puerto, Inundación por lluvia (pluvial), Vendaval (ráfagas de viento), Sismos Tormenta (descarga eléctrica), Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)
- a. Edificios
 - b. Muelles y equipos
-

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- c. Bodegas
 - d. Silos verticales
 - e. Silos horizontales
 - f. Áreas de Patios
 - g. Subestaciones eléctricas
 - h. Áreas de circulación vehicular / peatonal
 - i. Áreas de parqueaderos
 - j. Área de mantenimiento / Taller
 - k. Área de Inspección cadena de frio Estructuras de protección de Edificios
 - l. Muelles y equipos Bodegas
 - m. Silos verticales
 - n. Silos horizontales
 - o. Áreas de Patios
 - p. Subestaciones eléctricas
 - q. Áreas de circulación vehicular / peatonal
 - r. Áreas de parqueaderos
 - s. Área de mantenimiento / Taller
 - t. Área de Inspección cadena de frio
 - u. Estructuras de protección de muelle
-

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

8. ¿Cuál es la frecuencia con la que ocurren los siguientes eventos? [Califique cada amenaza escogiendo Nunca, rara vez, a veces, frecuente, muy frecuente] Opciones:
- a. Variación nivel del mar (inundación portuaria)
 - b. Erosión/socavación de márgenes del puerto Inundación por lluvia (pluvial)
 - c. Vendaval (ráfagas de viento)
 - d. Sismos Tormenta (descarga eléctrica)
 - e. Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)
9. ¿Cuáles considera que son las amenazas climáticas que afectan las siguientes áreas del puerto? [Selección múltiple]: Opciones: Variación nivel del mar (inundación portuaria), Erosión/socavación de márgenes del puerto Inundación por lluvia (pluvial), Vendaval (ráfagas de viento), Sismos Tormenta (descarga eléctrica), Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar).
- a. Edificios
 - b. Muelles y equipos
 - c. Bodegas
 - d. Silos verticales
 - e. Silos horizontales
 - f. Áreas de Patios
 - g. Sub estaciones eléctricas /
 - h. Áreas de circulación vehicular / peatonal
-

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- i. Áreas de parqueaderos
 - j. Área de mantenimiento / Taller
 - k. Área de Inspección cadena de frio Estructuras de protección de Edificios
 - l. Muelles y equipos Bodegas
 - m. Silos verticales
 - n. Silos horizontales
 - o. Áreas de Patios
 - p. Subestaciones eléctricas
 - q. Áreas de circulación vehicular / peatonal
 - r. Áreas de parqueaderos
 - s. Área de mantenimiento / Taller
 - t. Área de Inspección cadena de frio
 - u. Estructuras de protección de muelle
10. ¿Cuál es la frecuencia con la que ocurren los siguientes eventos? [Califique cada amenaza escogiendo Nunca, rara vez, a veces, frecuente, muy frecuente]. Opciones:
- Nunca – (No ha ocurrido en la última década); Rara vez (Sucedió una vez en la última década), A veces (Sucedió más de una vez, pero menos de 10 veces en la última década); Frecuente (Ocurre una vez al año); Muy frecuente (Ocurre más de una vez al año); No sé (Sin información suficiente).
- a. Variación nivel del mar (inundación portuaria)
-

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- b. Erosión/socavación de márgenes del puerto Inundación por lluvia (pluvial)
- c. Vendaval (ráfagas de viento)
- d. Sismos Tormenta (descarga eléctrica)
- e. Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)

IDENTIFICACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

11. ¿Cuál considera usted que es el nivel de exposición de la siguiente infraestructura ante las amenazas de la variabilidad/cambio climático? [Califique para cada estructura una opción]: Ninguno, Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto, Muy Alto.

- a. Edificios
- b. Muelles y equipos
- c. Bodegas
- d. Silos verticales
- e. Silos horizontales
- f. Áreas de Patios
- g. Subestaciones eléctricas
- h. Áreas de circulación vehicular / peatonal
- i. Áreas de parqueaderos
- j. Área de mantenimiento / Taller

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- k. Área de Inspección cadena de frio Estructuras de protección de Edificios
- l. Muelles y equipos Bodegas
- m. Silos verticales
- n. Silos horizontales
- o. Áreas de Patios
- p. Subestaciones eléctricas
- q. Áreas de circulación vehicular / peatonal
- r. Áreas de parqueaderos
- s. Área de mantenimiento / Taller
- t. Área de Inspección cadena de frio
- u. Estructuras de protección de muelle

IDENTIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

12. ¿Considera usted que las siguientes amenazas pueden impactar negativamente la infraestructura, personal, operación u otras? Seleccione cuales puede impactar. [Califique cada amenaza, selección múltiple]. Opciones. Infraestructura, Personal, Operación, Equipos, Carga, Motonave.

- a. Variación nivel del mar (inundación portuaria)
- b. Erosión/socavación de márgenes del puerto Inundación por lluvia (pluvial)

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- c. Vendaval (ráfagas de viento)
- d. Sismos Tormenta (descarga eléctrica)
- e. Ola de calor (Altas temperaturas / Radiación solar)

IDENTIFICACIÓN MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

13. ¿Considera que las siguientes áreas requieren mantenimiento o construcción de obras de adaptación o protección ante las amenazas de la variabilidad y cambio climático, actualmente? [Califique para cada estructura una opción]

GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

14. ¿COMPAS considera en su programa de gestión frente al cambio climático las amenazas y la vulnerabilidad portuaria?
- a. Totalmente en desacuerdo
 - b. En desacuerdo
 - c. Indeciso
 - d. De acuerdo
 - e. Totalmente de acuerdo

15. ¿Cuáles acciones implementadas por COMPAS frente al cambio climático conoce usted?
[Opción múltiple]

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- a. Evaluación y reducción de gases de efecto invernadero
- b. Plan de eficiencia energética
- c. Uso de energías renovables
- d. Reducción de huella de carbono Gestión del agua y residuos
- e. Gestión del conocimiento del cambio climático
- f. Análisis de vulnerabilidad
- g. Formulación de medidas de adaptación
- h. Otro

16. ¿Considera que COMPAS debe comunicar la políticas, planes y medidas frente a la variabilidad y cambio climático con sus grupos de interés internos y externos? [Escoja una opción]

- a. Totalmente en desacuerdo
- b. En desacuerdo
- c. Indeciso
- d. De acuerdo
- e. Totalmente de acuerdo

17. ¿Considera importante que Compas involucre a las comunidades de influencia directa en la gestión y las medidas que buscan reducir el cambio climático sus efectos? [Escoja una opción]

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

- a. Totalmente en desacuerdo
- b. En desacuerdo
- c. Indeciso
- d. De acuerdo
- e. Totalmente de acuerdo

18. ¿Considera importante que Compas haga parte de una agrupación local o regional de empresas del sector de portuario, competidores y aliados, para enfrentar los desafíos y adoptar estrategias de adaptación ante el cambio climático? [Escoja una opción]

- a. Totalmente en desacuerdo
- b. En desacuerdo
- c. . Indeciso
- d. De acuerdo
- e. Totalmente de acuerdo

19. ¿Conoce cuales medidas puede tomar usted y las personas de su entorno para prevenir el cambio climático? [Escoja una opción]

- a. Desconoce totalmente
- b. Poco conocimiento
- c. Neutro
- d. Conocimiento moderado

Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación
de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena

e. Buen conocimiento