

**VULNERABILIDAD OCEANOGRÁFICA DE LAS COSTAS VENEZOLANAS A LAS
MAREAS DE TORMENTA Y SOBRE-ELEVACIÓN DEL MAR DEBIDO A LA ACCIÓN
DE LOS HURACANES**

Ing. Rafael Bécemberg

Trabajo de ascenso presentado ante la
Universidad Católica Andrés Bello para optar
al grado de profesor asociado

Caracas, Octubre de 2017

DEDICATORIAS

A mi esposa e hijo por haberme estimulado durante toda la ejecución del trabajo.

A la empresa donde trabajo: Incostas, por haberme permitido tomar parte de su tiempo para invertirlo en este trabajo sin exigirme nada a cambio.

Al Sr. Gilberto González cuya invaluable ayuda en el manejo de la inmensa base de datos de huracanes, hizo mucho más fácil mi trabajo intelectual, permitiéndome el planteamiento de cualquier escenario que se me ocurriera.

A la arquitecta Vanessa Briceño quien me ayudó desinteresadamente en la obtención de los escenarios de inundación de Isla de Aves.

A mi persona, por haber tenido la fortaleza mental suficiente para culminar este laborioso trabajo, a pesar de la situación-país reinante y los problemas socio-económicos asociados.

RESUMEN

Es innegable que la República Bolivariana de Venezuela se encuentra expuesta a riesgos relevantes y por ende presenta una alta vulnerabilidad asociada a la gran concentración de población que se encuentra asentada en zonas sin planificación urbana, específicamente en la franja norte costera, expuesta a un conjunto de amenazas tanto naturales como antrópicas (Informe País Venezuela 2010), entre las cuales están las del tipo oceanográficas y climáticas cuyo estudio está poco desarrollado en el país, lo cual podría justificarse por el hecho de que su influencia es relativamente moderada si se compara con otros países.

Entre estas “amenazas” una de las más relevantes es la asociada con el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), que es sin dudas la más importante variabilidad climática interanual que se tiene identificada en los actuales momentos, debido a los efectos que tiene sobre las condiciones meteorológicas tanto en las cercanías como en sitios muy distantes de su lugar de origen, especialmente sobre parámetros como la temperatura del agua, corrientes marinas, patrones de viento, régimen de precipitaciones, y en general sobre actividades económicas y humanas, siendo de hecho, responsable de una gran parte de los cambios que ocurren año tras año en los climas locales de numerosas regiones del mundo.

En este trabajo se encontró una relación que permite predecir con un alto nivel de certidumbre como va a ser un año, desde el punto de vista de si será un año “El Niño”, un año “La Niña” o un año “Neutral” con las consideraciones asociadas en cuanto al número e intensidad de los fenómenos que pudieran presentarse en el período de estudio, siendo resaltante el hecho de que la predicción puede hacerse sin la utilización de grandes y complicados modelos climáticos, sino empleando únicamente los datos de anomalías de la temperatura superficial del mar que la NOAA registra periódicamente en el océano Pacífico, lo cual permitió utilizar esta información para generar mapas de probabilidades de ocurrencia y de excedencia de que se presenten fenómenos como depresiones o tormentas tropicales o huracanes grado 1 al 5 en un dominio de estudio específico.

Adicionalmente se desarrolló y validó una metodología general para realizar estimaciones puntuales del aumento del nivel del mar (“Storm Surge”), que es una de las consecuencias directas de la “la amenaza” estudiada en este trabajo, y que está asociada al tránsito por el área de estudio de fenómenos meteorológicos como depresiones y tormentas tropicales, así como de huracanes. El sitio piloto de estudio fue el sector donde se ubica la Isla de Aves (pequeña isleta de gran importancia geopolítica para Venezuela), situada en pleno mar Caribe a unos 660 km al norte de las costas venezolanas y a unos 200 km al oeste de las islas de Guadalupe y Dominica, que le agrega unos 75.000 km² de áreas marinas y submarinas explotables a Venezuela a la luz del moderno Derecho del Mar, pudiéndose estimar entre otros aspectos que la incidencia de huracanes de grado 2 sobre la isla, tienen un período de retorno del orden de 10 años y sobre-elevaciones promedio del nivel del mar del orden de 2,5 m, los cuales aunque prácticamente dejan a la isla totalmente sumergida, no comprometen su estabilidad estructural ya que el continuo accionar del oleaje y del viento, en conjunción con la función protectora y potenciadora de retención de arena que tiene el arrecife frangeante que bordea a buena parte del perímetro de la isla, han permitido que el material lavado sea restituido con nuevos aportes de arena.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	<i>INTRODUCCIÓN GENERAL. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....</i>	<i>10</i>
1.1	OBJETIVOS DEL TRABAJO.	11
2.	<i>PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO Y LAS ECUACIONES DE LA ATMÓSFERA. 13</i>	
2.1	PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO.....	13
2.2	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PREDICCIÓN NUMÉRICA.	14
2.3	ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA EN COORDENADAS INERCIALES.	16
2.4	ECUACIONES DEL VIENTO GEOSTRÓFICO.	20
3.	<i>IDENTIFICACIÓN DE LAS AMENAZAS NATURALES QUE PUEDEN AFECTAR LAS ÁREAS MARINAS DE LAS COSTAS VENEZOLANAS. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN.</i>	<i>21</i>
3.1	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.	22
3.2	SELECCIÓN DE LA AMENAZA A SER ESTUDIADA.	23
4.	<i>TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE.</i>	<i>24</i>
4.1	ASPECTOS GENERALES.	24
4.2	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA TEMPORADA DE HURACANES “PROMEDIO Ó TÍPICA”.	24
4.2.1	Trayectorias promedios por mes de los huracanes.....	24
4.3	BASE DE DATOS UTILIZADA Y SUS LIMITACIONES.....	29
4.4	EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS). CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES E ÍNDICES DE CUANTIFICACIÓN DEL FENÓMENO.	29
4.4.1	Características principales.....	31
4.4.2	Índices de cuantificación del fenómeno.....	32
4.4.3	Sistemas de clasificación de eventos “El Niño” y “La Niña”	35
5.	<i>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE (LAPSO: 1851-2016).....</i>	<i>36</i>
5.1	INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES.....	36
5.2	RELACIÓN ENTRE LA OCURRENCIA DE EVENTOS “EL NIÑO” O “LA NIÑA” Y LA INTENSIDAD DE LA TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO.....	37
5.2.1	Predicción del índice ONI promedio anual a partir de su relación con el índice ONI de un mes en particular.	38
6.	<i>GENERACIÓN DE MAPAS DE DIFERENTES VARIABLES RELACIONADAS CON EL ACCIONAR Y COMPORTAMIENTO DE CICLONES TROPICALES EN EL MAR CARIBE.</i>	<i>42</i>
6.1	SELECCIÓN DEL DOMINIO DE ESTUDIO Y LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL UTILIZADA PARA SU ANÁLISIS.	42

6.2	GENERACIÓN DE MAPAS CARACTERIZADORES DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA CUENCA ATLÁNTICA.....	44
6.2.1	Selección del método de interpolación utilizado para el cálculo espacial de las variables de estudio.	45
6.2.2	Análisis de los mapas generados.	46
7.	METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL PELIGRO Y RIESGO ASOCIADO AL TRÁNSITO DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EN UN DOMINIO DE CÁLCULO ESPECÍFICO.	48
7.1	REGISTRO DE LOS CICLONES TROPICALES.	48
7.2	CÁLCULO DE LA TASA DE EXCEDENCIA, FUNCIÓN DE PELIGRO Y PERÍODO DE RETORNO ASOCIADO AL PASO DE CICLONES TROPICALES EN LAS CERCANÍAS DE ISLA DE AVES.	49
8.	CÁLCULO GENERAL DE LAS DIFERENTES COMPONENTES ASOCIADAS A LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL MAR.	51
8.1	COMPONENTE ASTRONÓMICA DEL NIVEL DEL MAR (MAREA).	52
8.2	COMPONENTE METEOROLÓGICA Ó MAREA DE TORMENTA ("STORM SURGE"). ESTADO DEL ARTE.	53
8.2.1	Cálculo del componente meteorológico de la marea.....	54
8.3	CÁLCULO DE LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR POR OLEAJE O SET-UP.	58
9.	BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE ISLA DE AVES Y CÁLCULO DE LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR POR EFECTO DE LAS DIFERENTES COMPONENTES ASOCIADAS AL PASO DE TORMENTAS TROPICALES Y HURACANES.	59
9.1	BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE ISLA DE AVES Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.	59
9.2	EQUILIBRIO DINÁMICO DE LA ISLA.	60
9.3	CÁLCULO DE LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR ASOCIADO AL PASO DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS CERCA DE ISLA DE AVES.	61
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	72
10.1	CONCLUSIONES.	72
10.2	RECOMENDACIONES.....	73
11.	ANEXOS.....	74
11.1	CONCEPTOS ASOCIADOS AL RIESGO, SU METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y SU GERENCIA.....	75
11.1.1	Estimación del peligro y del riesgo asociado a la presencia y acción de ciclones tropicales. Escala de Saffir-Simpson.	76
11.2	DATOS RELEVANTES DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO, OBTENIDOS A PARTIR DE LA BASE DE DATOS HURDAT (LAPSO: 1851-2016).	78

11.3 ALTERACIONES OCEÁNICAS Y ATMOSFÉRICAS ASOCIADAS A LA OCURRENCIA DEL FENÓMENO “ENOS” Y ESQUEMATIZACIÓN DEL FENÓMENO.	80
11.4 BASE DATOS DEL ÍNDICE ONI DE LA NOAA.	85
11.5 MAPAS CARACTERIZADORES DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS.	86
11.6 CÁLCULO TÍPICO DE TASA DE EXCEDENCIA, FUNCIÓN DE PELIGRO, PERÍODO DE RETORNO Y RIESGO ASOCIADO AL PASO DE CICLONES TROPICALES POR UN DETERMINADO SECTOR.	116
11.6.1 Tasa de excedencia.	116
11.6.2 Peligro.	118
11.6.3 Período de retorno.	120
11.6.4 Cálculo del riesgo, su relación con el valor de los bienes expuestos y el grado de vulnerabilidad de éstos.	120
11.7 CARACTERÍSTICAS DEL RÉGIMEN DE MAREAS EN EL ÁREA DE ISLA DE AVES.	123
11.8 BATIMETRÍA DE ISLA DE AVES Y PLANOS DE REFRACCIÓN DEL OLEAJE	124
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Sistema de coordenadas cartesianas y su relación con la superficie terrestre.	19
Figura 3-1. Esquema de las áreas marinas y submarinas de la República Bolivariana de Venezuela en el mar Caribe y el Océano Atlántico. Fuente: Nieves-Croes (2010) y modificado por el autor.	21
Figura 4-1. Hitos en los sistemas de observación de ciclones tropicales en el Atlántico tropical. Fuente: Sheets (1990) y modificado por el autor.	25
Figura 4-2. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Junio.	26
Figura 4-3. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Julio.	26
Figura 4-4. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Agosto.	26
Figura 4-5. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Septiembre.	27
Figura 4-6. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Octubre.	27
Figura 4-7. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Noviembre.	27
Figura 4-8. Promedio histórico de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica (1851-2016).	28
Figura 4-9. Eventos “El Niño” para el período 1525-1987.	30
Figura 4-10. Eventos “El Niño” para el período 1900-1987.	30
Figura 4-11. Regiones Niño en el Océano Pacífico ecuatorial. Fuente: IRI (2007).	33
Figura 4-12. Recopilación de diferentes índices utilizados para caracterizar eventos “El Niño”.	34
Figura 5-1. Correlación matemática entre el índice ONI del mes de Junio y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2016.	39
Figura 5-2. Correlación matemática entre el índice ONI promedio de los meses de Mayo, Junio y Julio, y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2016.	39
Figura 5-3. Correlación matemática entre el índice ONI del mes de Enero y el índice ONI promedio anual tomando como año el período Julio del presente año a Junio del siguiente año. Lapso 1950-2017.	40
Figura 5-4. Comparación de los valores del índice ONI calculados a partir de las mediciones de la NOAA y los predichos con la ecuación desarrollada.	41
Figura 6-1. Trayectorias de todos los ciclones tropicales documentados para el Atlántico Norte (1851-2016).	43
Figura 6-2. Ubicación relativa del dominio de estudio con respecto al espacio total por el que han transitado los fenómenos meteorológicos en el océano Atlántico.	43
Figura 7-1. . Elemento o “nodo de cálculo” típico utilizado para discretizar el dominio de estudio.	48
Figura 8-1. Ubicación relativa entre la estación donde se dispone de predicciones de marea e isla de Aves.	53
Figura 8-2. Trayectoria de un ciclón tropical con respecto a la línea de costa.	57
Figura 8-3. Área de localización de los máximos vientos circundando al centro del ciclón tropical.	57
Figura 9-1. Ubicación relativa de isla de Aves en el mar Caribe.	59
Figura 9-2. Vista tridimensional de la Dorsal Mariner y de la plataforma sobre la que se ubica isla de Aves.	60
Figura 9-3. Cambios generales de la línea costera. Período: 1968-2012.	61
Figura 9-4. Cambios mensuales de la línea costera.	62
Figura 9-5. Fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves. Lapso: 1851-2017.	63
Figura 9-6. Panorámica de la base científico naval instalada en isla de Aves.	66

Figura 9-7. Topobatemetría de isla de Aves referida al nivel medio del mar.	67
Figura 9-8. Relieve de isla de Aves que permanece emergido luego de ser afectado por eventos que generan una sobre-elevación del nivel medio del mar de: a) 0,5 m), b) 0,75 m, c) 1,0 m. ...	68
Figura 9-9. Relieve de isla de Aves que permanece emergido luego de ser afectado por eventos que generan una sobre-elevación del nivel medio del mar de: a) 1,5 m), b) 1,75 m, c) 2,0 m. ...	69
Figura 9-10. Relieve de isla de Aves que permanece emergido luego de ser afectado por eventos que generan una sobre-elevación del nivel medio del mar de: a) 2,25 m), b) 2,5 m, c) 2,75 m	70
Figura 11-1. Distribución espacial de las principales teleconexiones termométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS.....	82
Figura 11-2. Distribución espacial de las principales teleconexiones pluviométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS.....	82
Figura 11-3. Modelo convectivo, de temperatura del mar y de surgencia, bajo condiciones de “El Niño”, “La Niña” y condición neutra.....	83
Figura 11-4. Esquema de las variaciones que ocurren en la profundidad de la termoclina y en el Nivel Medio del Mar, bajo condiciones Neutras, de El Niño y de La Niña.....	84
Figura 11-5. Distribución del número de depresiones y tormentas tropicales y de huracanes en la cuenca Atlántica. Lapso: 1851-2016.	86
Figura 11-6. Frecuencia relativa del número de depresiones y tormentas tropicales y de huracanes en la cuenca Atlántica. Lapso: 1851-2016 (fracción del máximo que se localiza en las coordenadas: Lat. 33,75° N : Long. 75,75° O con 55 sistemas).....	87
Figura 11-7. Presiones centrales mínimas (milibares) de cada fenómeno meteorológico a su paso por el dominio de estudio. Lapso: 1851-2016.....	88
Figura 11-8. Velocidades máximas de traslación (en km/h) de cada uno de los fenómenos meteorológicos que han ocurrido en el lapso 1851-2016.....	89
Figura 11-9. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales. Lapso: 1851-2016... ..	90
Figura 11-10. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales. Lapso: 1851-2016. ...	91
Figura 11-11. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1. Lapso: 1851-2016.....	92
Figura 11-12. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2. Lapso: 1851-2016.....	93
Figura 11-13. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3. Lapso: 1851-2016.....	94
Figura 11-14. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4. Lapso: 1851-2016.....	95
Figura 11-15. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 5. Lapso: 1851-2016.....	96
Figura 11-16. Años Neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales. Lapso: 1950-2016.	97
Figura 11-17. Años Neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales. Lapso: 1950-2016.	98
Figura 11-18. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1. Lapso: 1950-2016.	99
Figura 11-19. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2. Lapso: 1950-2016.	100
Figura 11-20. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3. Lapso: 1950-2016.	101
Figura 11-21. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4. Lapso: 1950-2016.	102
Figura 11-22. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales. Lapso: 1950-2016.	103
Figura 11-23. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales. Lapso: 1950-2016.	104
Figura 11-24. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1. Lapso: 1950-2016.	105
Figura 11-25. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2. Lapso: 1950-2016.	106
Figura 11-26. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3. Lapso: 1950-2016.	107
Figura 11-27. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4. Lapso: 1950-2016.	108

Figura 11-28. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales. Lapso: 1950-2016.	109
Figura 11-29. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales. Lapso: 1950-2016.	110
Figura 11-30. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1. Lapso: 1950-2016.	111
Figura 11-31. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2. Lapso: 1950-2016.	112
Figura 11-32. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3. Lapso: 1950-2016.	113
Figura 11-33. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4. Lapso: 1950-2016.	114
Figura 11-34. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 5. Lapso: 1950-2016.	115
Figura 11-35. Tasa de excedencia anual asociada a la intensidad del fenómeno.	118
Figura 11-36. Función de vulnerabilidad ante una inundación para una vivienda tipo II.	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de modelos numéricos según su escala espacial.....	16
Tabla 3-1. Amenazas naturales con potencial de afectación de las áreas marino costeras de Venezuela.	22
Tabla 4-1. Evolución promedio de una temporada de huracanes en la cuenca Atlántica (1944-2016).	28
Tabla 4-2. Regiones o zonas Niño y sus dimensiones e índices asociados.	32
Tabla 4-3. Diferentes índices utilizados para caracterizar y cuantificar los eventos ENOS (“El Niño” o “La Niña”).	33
Tabla 4-4. Cronología de eventos “El Niño” y “La Niña”. Lapso: 1950-2016.....	35
Tabla 5-1. Cambios por décadas en la actividad ciclónica en el Atlántico Norte.	37
Tabla 5-2. Comparación de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte para períodos específicos de tiempo.....	37
Tabla 5-3. Relación entre el promedio anual del índice ONI y algunas características relevantes de las temporadas de huracanes en el Atlántico.....	41
Tabla 7-1. Caracterización y contabilización de los distintos fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves (Lapso: 1851-2017).....	49
Tabla 7-2. Tasa de excedencia, función de peligro y período de retorno asociados al paso de ciclones en áreas cercanas a isla de Aves.....	49
Tabla 9-1. Características y fecha de ocurrencia de los fenómenos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves. Lapso: 1851-2017.....	63
Tabla 9-2. Sobre-elevaciones totales asociadas a cada fenómeno meteorológico que ha pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves. Lapso: 1851-2017.....	65
Tabla 9-3. Sobre-elevación total del nivel de mar en isla de Aves asociada a la intensidad de los fenómenos meteorológicos sin tomar en cuenta la variación de la marea.....	66
Tabla 11-1. Escala de Saffir-Simpson.....	77
Tabla 11-2. Alteraciones oceánicas y atmosféricas generadas por el fenómeno ENOS en el Pacífico ecuatorial.	80
Tabla 11-3. Manifestaciones climáticas y ecológicas globales, relacionadas con la ocurrencia del ENOS.	81
Tabla 11-4. Resultado de una “búsqueda típica” de cuantificación y caracterización en cada celda de cálculo que conforma el domino de estudio.....	116
Tabla 11-5. Tasa de excedencia.	118
Tabla 11-6. Función de peligro anual asociada a cada intensidad de la amenaza estudiada. .	119
Tabla 11-7. Períodos de retorno asociados a cada intensidad del fenómeno o amenaza estudiada.....	120
Tabla 11-8. Función de vulnerabilidad asociada a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos de diversa intensidad.	121

1. INTRODUCCIÓN GENERAL. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.

Una marejada de tormenta ("Storm Surge") es el aumento anormal de la altura de la superficie libre del océano debido a un forzamiento atmosférico con esfuerzos cortantes del campo de vientos y variaciones significativas de la presión atmosférica en la superficie del mar, asociados con fenómenos meteorológicos como ciclones, huracanes y tifones, siendo las oleadas de tormenta costera las responsables históricas del 90% de las muertes relacionadas con huracanes.

Si bien es cierto que las costas venezolanas continentales están en general mucho menos expuestas a la acción de estos fenómenos que otras áreas como la costa del golfo de México, y de estados de EUA como Texas, Louisiana, Florida, etc. donde la acción de un huracán puede generar oleadas de tormenta de hasta 9 m (Huracán Katrina en 2005), o de países como Bangladesh donde en noviembre de 1970 un ciclón produjo alturas de inundación que sobrepasaron los 10 m, las mismas no están totalmente exentas de su acción.

Las consecuencias de un huracán mayor (grado 3 o superior en la escala de Saffir-Simpson) son de tal significancia, que desde hace 50 años algunos grupos de científicos trataron por primera vez de detener por completo a los huracanes, siendo Simpson y Brier (1967) los pioneros en el diseño de experimentos a gran escala cuyo objetivo era evaluar el efecto de sembrar yoduro de plata en cúmulos de nubes oceánicas, conocido como el "Stormfury Project" (proyecto tormenta furiosa).

Los desarrollos "Post-Camille" (devastador huracán grado 5 ocurrido en 1969) de los modelos de oleaje de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) han devenido en mejores pronósticos de huracanes y evacuaciones costeras, a la vez que han contribuido en la planificación del desarrollo costero y en las rutas de evacuación ante la ocurrencia de huracanes. Estos desarrollos también pueden atribuirse al considerable aumento que se ha realizado en lo referente a la concientización que sobre las mareas de tormenta se ha hecho entre los residentes costeros (NOAA, 2005). Sin embargo, la oleada de tormenta inducida por huracanes sigue siendo la principal causa asociada a evacuaciones costeras.

Adicionalmente, el aumento de la temperatura global de la superficie del mar pudiera ser un catalizador para que huracanes más intensos golpeen bahías y estuarios y generen oleadas de tormenta como las descritas anteriormente, agravándose aún más este escenario si se toma en cuenta el pronóstico de una aceleración elevada del nivel del mar en el siglo XXI (Church et al., 2001).

Por otra parte, es innegable que la República Bolivariana de Venezuela se encuentra expuesta a riesgos relevantes y por ende presenta una alta vulnerabilidad asociada a la gran concentración de población que se encuentra asentada en zonas sin planificación urbana, específicamente en la franja norte costera, expuesta a un conjunto de amenazas tanto naturales como antrópicas (Informe País Venezuela 2010), entre las cuales están las del tipo oceanográficas y climáticas cuyo estudio está poco desarrollado en el país, lo cual podría justificarse por el hecho de que su influencia es relativamente moderada si se compara con otros países.

Entre estas "amenazas" una de las más relevantes es la asociada con el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), hecho que se ve reflejado en la gran cantidad de artículos publicados sobre lo que se podría considerar como la más importante variabilidad climática interanual que se tiene identificada en los actuales momentos, dados los efectos que dicho fenómeno tiene sobre las condiciones meteorológicas, tanto en las cercanías como en sitios muy distantes de su lugar de origen, especialmente sobre variables como la temperatura, corrientes marinas, patrones de viento, régimen de

precipitaciones, y en general sobre actividades económicas y humanas, siendo de hecho responsable de una gran parte de los cambios que ocurren año tras año en los climas locales de numerosas regiones del mundo.

Bécemberg (2013) demostró la existencia de relaciones entre la intensidad de la temporada de huracanes en el Atlántico y la ocurrencia de “El Niño” o “La Niña”, y dado el hecho de que la tendencia no solamente a nivel mundial sino también en Venezuela, es a que cada vez con mayor frecuencia la exploración petrolera y gasífera se realice en el mar, cobra especial relevancia obtener no solamente la mayor cantidad posible de información sobre las variables meteorológicas y oceanográficas presentes en el área a ser explorada, sino también poder generar predicciones a corto y mediano plazo de fenómenos como los huracanes, que podrían incidir fuertemente sobre las actividades que se estén realizando dentro de su áreas de influencia.

Esto cobra mayor vigencia si se toma en cuenta el hecho de que en el mismo trabajo se encontró que hasta finales de la década de los 60, el porcentaje de fenómenos meteorológicos (depresiones y tormentas tropicales, y huracanes) que habían pasado sobre o cerca del territorio venezolano fue del orden de 2%, mientras que en lo que va del siglo XXI dicho porcentaje se incrementó en más del 100% hasta valores del orden de 4,8%, que aunque sigue siendo relativamente bajo, pareciera que va a continuar su tendencia al alza debido al cambio climático que está experimentando el planeta.

1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO.

Los objetivos que persiguió el desarrollo de este trabajo, sin que el orden en que se nombran esté asociado a su importancia, fueron:

- a) Identificación general de los diferentes fenómenos naturales que pueden convertirse en potenciales amenazas a las áreas marino-costeras de la República Bolivariana de Venezuela, para luego proceder a analizar específicamente aquella o aquellas amenazas relacionadas con el paso de huracanes por el mar Caribe, que en el caso de este trabajo fue el aumento puntual del nivel del mar por efecto del paso de un fenómeno meteorológico por una determinada área, efecto conocido como “marea de tormenta”, o “Storm Surge” como se conoce en el idioma inglés.

Para ello, se analizó el comportamiento general de las temporadas de huracanes en el Atlántico Norte, desde el punto de vista de la variabilidad temporal de su intensidad y de la frecuencia de ocurrencia, tomándose la data histórica disponible (Base de datos HURDAT) que contiene las trayectorias y características principales que han seguido los ciclones tropicales y huracanes desde 1851 hasta el presente, con el objeto de obtener estadísticas generales para períodos de tiempo específicos de acuerdo con las limitaciones y calidad que tenga la información contenida en la base de datos utilizada, tratando de establecer en forma concomitante si existe o no dependencia entre la influencia de estos fenómenos y la ocurrencia o no de eventos ENOS (tanto eventos cálidos como “El Niño”, como los eventos fríos como “La Niña”), que al ser relativamente predecibles permitiría tomar las medidas preventivas o mitigantes según fuese el caso.

- b) Generación de cartas generales con información climatológica a partir del procesamiento estadístico de la base de datos de trayectorias e intensidades de los ciclones tropicales que han afectado el océano Atlántico, al ser éstos el mecanismo generador de la “amenaza” estudiada (marea de tormenta). Se seleccionó como dominio general de estudio, una buena parte del mar Caribe asegurándose de cubrir a la “Isla de Aves” (pequeña isleta de gran

importancia geopolítica para Venezuela), entendiendo que dichas cartas deben conformar una parte sustantiva dentro de cualquier Gestión Integral de Riesgo relacionada con la prevención de desastres y con cualquier planificación física y territorial que se considere seria, para cuyo desarrollo es fundamental el conocimiento de la condición de riesgo que los provoca.

- c) Posteriormente, del dominio general de estudio se seleccionó un sector específico donde se desarrolló una metodología general para realizar estimaciones puntuales del aumento del nivel del mar, que es una de las consecuencias directas de la “la amenaza” estudiada en este trabajo, y que está asociada al tránsito por el área de estudio de fenómenos meteorológicos como depresiones y tormentas tropicales, así como de huracanes. El sitio piloto de estudio fue el sector donde se ubica la isla de Aves, en pleno mar Caribe, ubicada a unos 560 km al norte de las costas venezolanas y a unos 200 km al oeste de las islas de Guadalupe y Dominica. La selección específica de esta área obedeció a dos (2) factores: en primer lugar es la porción del territorio venezolano que está más expuesta a la acción de este tipo de fenómenos y donde se dispone de toda la información necesaria para realizar los cálculos de sobre-elevación del mar que éstos originan, mientras que el segundo factor está asociado con el alto valor geopolítico que tiene esta isla, agregándole unos 75.000 km² de áreas marinas y submarinas explotables a Venezuela a la luz del moderno Derecho del Mar.
- d) Implementación de una metodología que permite cuantificar la “amenaza” estudiada en términos de la tasa de excedencia, de la función de peligro, del período de retorno y del riesgo asociado al paso de ciclones tropicales por un determinado sector, todos los cuales conforman elementos básicos de información en la generación de mapas de peligro asociados a una determinada amenaza. Este análisis se hizo específicamente para el área donde se ubica “Isla de Aves”, aunque dicha metodología puede ser aplicada en cualquier área costera.

2. **PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO Y LAS ECUACIONES DE LA ATMÓSFERA.**

En esta sección se hace una breve descripción y presentación de las ecuaciones generales que sirven para caracterizar la dinámica atmosférica, a los fines de ofrecer una visión general de la complejidad subyacente en los modelos que involucran la predicción numérica del tiempo.

2.1 **PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO.**

Aún cuando en este trabajo no se desarrolla ningún modelo matemático predictivo, si se realizó una investigación sobre el proceso de formulación y evolución de los mismos, en diversos libros de meteorología dinámica.

Holton (1992), define a la Meteorología Dinámica como el estudio de los diferentes movimientos de la atmósfera, asociados con el tiempo y el clima, teniéndose que para todos esos movimientos la naturaleza molecular discreta de la atmósfera puede ser ignorada, y en consecuencia la atmósfera puede ser considerada como un medio fluido continuo, o "*continuum*", teniéndose a su vez que un punto de ese "*continuum*" se considera como un elemento de volumen muy pequeño si se le compara con el volumen de la atmósfera bajo consideración, pero que todavía contiene un gran número de moléculas.

Kalnay (2003) aborda el hecho de que en la actualidad, el pronóstico diario del tiempo está basado en una actividad conocida como "*Numerical Weather Prediction (NWP)*". El *NWP* es la simulación numérica del comportamiento de la atmósfera basado en la física y la dinámica de ella, pero afirma que ese hecho es "sólo la mitad de la historia", ya que las condiciones iniciales de las simulaciones deben estar basadas necesariamente en observaciones, las cuales no son perfectas, siendo incluso algunas de ellas peores que las pronosticadas por el *NWP* por lo que se debe realizar "la asimilación de los datos", que no es más que el proceso de preparar las condiciones iniciales requeridas para hacer la predicción numérica del tiempo, logrando la mejor combinación de observaciones y pronósticos.

En cualquier caso, se tiene que la predicción numérica del tiempo pasa necesariamente por el desarrollo e implementación de un modelo matemático compuesto por ecuaciones diferenciales parciales, con las cuales se pretende reflejar las leyes generales de la física que rigen a la atmósfera terrestre.

Estos modelos, conocidos como modelos climáticos y meteorológicos, aplican a la atmósfera las ecuaciones de la dinámica de fluidos, de la física y de la química, y dado que la atmósfera conforma un sistema no permanente y no uniforme, para poder predecir sus cambiantes características (el estado del tiempo), los sistemas de ecuaciones representativos deben resolverse sobre un amplio espectro de puntos del sistema (atmósfera en este caso), cubriéndola tanto vertical como horizontalmente.

Si estas simulaciones se realizan durante un período prolongado de tiempo, puede estimarse tanto el estado promedio del sistema como su variabilidad intrínseca (vale decir: el clima), pudiéndose con ello hacerse pronósticos del tiempo a corto plazo, así como plantear y analizar escenarios hipotéticos, observando como reacciona el sistema a distintos tipos de cambios (análisis de sensibilidad) o forzamientos, como lo pudieran ser por ejemplo: variaciones en la energía emitida por el sol, aumentos de la concentración de gases de efecto invernadero, o cambios importantes en el uso de la superficie terrestre.

El crecimiento exponencial en el avance en la predicción numérica del tiempo ha ido de la mano del desarrollo de grandes y poderosas computadoras.

Según Lezaun (2003), la capacidad de cálculo de las computadoras utilizadas en meteorología se ha ido incrementando desde 3000 operaciones/segundo (IBM 701) en 1955, a 2,5 millones de operaciones/segundo (CDC 6600) en 1966, a 7000 millones de operaciones/segundo (Cray C98) en el año 1991, hasta los 100 mil millones de operaciones/segundo (Fujitsu VPP 5000) instalado en Météo-France a finales de 1999.

Para concluir, el mismo Lezaun aborda el incremento en la calidad de los pronósticos, teniéndose que en 1954 las previsiones que se hacían con el modelo barotrópico (ver aparte 2.2) para un plazo de 24 horas eran equivalentes a las que se realizaban en 1995 en el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a medio plazo, para un período de 6 días.

No obstante, esta relación se está agotando, ya que los modelos numéricos han alcanzado un grado de desarrollo tal, que las nuevas mejoras deben enfocarse hacia nuevas investigaciones y no dirigirse solamente hacia el aumento de la potencia del computador.

De hecho, a finales de la década de 1950 el pensamiento general era que las imprecisiones de los modelos numéricos de predicción meteorológica que se utilizaban, estaban fundamentalmente asociadas al tamaño de las celdas de discretización sobre las cuales se realizaban los cálculos (Houghton, 2005).

Sin embargo, a mediados de la década de 1960, E.N Lorentz y P.D Thompson ya tenían sospechas sobre el hecho de que sobre los límites de la predictibilidad de los modelos meteorológicos incidían otros factores adicionales a las concebidas limitaciones de cálculo, encontrando que los modelos numéricos que utilizaban eran extremadamente sensibles a pequeños cambios en las condiciones iniciales a partir de las cuales iniciaban los cálculos. Thompson además pudo precisar que la calidad de la predicción estaba directamente vinculada con la disponibilidad completa de datos de las estaciones meteorológicas que utilizaba, dado que si no se disponía de la información completa, el modelo debía obtenerla mediante metodologías de interpolación, con la consecuente disminución de la calidad de la predicción.

Lorentz (1965) trabajando sobre el mismo tema, observó que dos (2) predicciones distintas que comenzaron a iterar a partir de condiciones iniciales muy parecidas, podían generar predicciones muy distintas sobre el estado del tiempo, transcurrido un determinado lapso.

De hecho, aún hoy en día, aunque los modelos climáticos constituyen herramientas fundamentales para el estudio y avance en la comprensión y predicción de la variabilidad climática y el cambio climático tanto natural como el de origen antropogénico, el hecho de que sean representaciones simplificadas de los diversos procesos físico-químicos que intervienen y modelan la evolución del cambio climático, hace que sus resultados estén sujetos a errores que en muchos casos, son de la misma magnitud que los cambios que efectivamente se producen en el clima y que se quieren simular.

2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PREDICCIÓN NUMÉRICA.

La evolución histórica de la predicción numérica está ligada fundamentalmente a la disminución de las hipótesis necesarias tendientes a simplificar el sistema de

ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que conforman el modelo matemático a los fines de que sea resuelto con más facilidad.

Ello da origen a diferentes tipos de modelos, tales como:

Modelos barotrópicos: Son los modelos más simples y fueron desarrollados para trabajar en los años 40 (del siglo XX) en las primeras computadoras. Están basados en lo que se conoce como la “hipótesis barométrica” consistente en suponer que las superficies isobáricas o de presión constante coinciden con las superficies de densidad constante, de forma tal que el gradiente isobárico de temperatura es cero y el viento geostrófico no varía con la altura.

Esta aproximación permitió hacer predicciones cerca del nivel de la atmósfera en el que la divergencia del viento es igual a cero (aproximadamente a 500 hPa.), predicciones que naturalmente arrojaban resultados que normalmente estaban alejados de la realidad.

Modelos baroclinos: En los años 60, el aumento en la potencia de cálculo de las nuevas computadoras permitió la aparición de modelos menos restrictivos y simplificados que los modelos barotrópicos, conocidos como modelos baroclinos, en los cuales se considera una atmósfera baroclina en la que las superficies isobáricas e isopícnicas no coinciden, por lo que el gradiente isobárico de temperatura es distinto de cero y el viento geostrófico es variable con la altura, pero sólo en módulo y no en dirección.

Los resultados obtenidos, si bien eran mejores que los obtenidos con los modelos barotrópicos, eran también claramente insuficientes para ser utilizados en la predicción diaria del tiempo.

Modelos de ecuaciones primitivas: En la década de los setenta, con el continuo crecimiento de la capacidad de cálculo de las computadoras, se volvieron a “relajar” las hipótesis restrictivas existentes hasta los momentos, dando origen a la utilización de los llamados modelos de ecuaciones primitivas que aún cuando utilizaban las ecuaciones diferenciales parciales simplificadas, mantenían las variables que eran directamente observables (temperatura, humedad y componentes del viento), a diferencia de los modelos previos que se basaban en el uso de la vorticidad y la divergencia del viento, las cuales posteriormente eran convertidas en valores de componentes del viento y temperatura. Este tipo de modelos consideraban ya una completa estructura vertical de la atmósfera y se convirtieron en los primeros modelos numéricos que arrojaban resultados lo suficientemente buenos como para ser utilizados en la predicción diaria del tiempo por parte de los servicios meteorológicos.

En la actualidad, todos los modelos numéricos operativos de importancia en el mundo son modelos en ecuaciones primitivas, llegando a un nivel en el cual se ha comprobado que las diferencias existentes entre los datos reales y los pronosticados no tienen su origen en deficiencias relacionadas con la formulación de las ecuaciones diferenciales envueltas, sino en la forma en que éstas son discretizadas y resueltas.

Un primer problema surgía con las resoluciones espaciales, tanto horizontal (Δx) como vertical (Δy) del elemento de integración, mientras que el segundo problema estaba relacionado con la discretización temporal (Δt).

Las soluciones adoptadas para paliar estos dos (2) efectos (celdas de cálculo más pequeñas y resueltas a intervalos de tiempo Δt más pequeños), han sido las

que han marcado la pauta y la evolución de los modelos numéricos de predicción del tiempo durante al menos los últimos 35 años, y se han visto favorecidas por el incremento de la capacidad de cálculo de los nuevos y más poderosos ordenadores.

Modelos de mesoescala: Es evidente que el aumento de la resolución horizontal y vertical de los modelos matemáticos gracias a la utilización de ordenadores de mayor capacidad de cálculo, se traduce en sustanciales mejoras en la representación que se pueda hacer de la orografía de la superficie de la Tierra dentro del modelo, y dado que el efecto de la orografía es muy importante en la atmósfera, los resultados numéricos que se obtengan mejorarán sustancialmente en la medida en que se pasa de celdas de resoluciones de 100 km a celdas de resolución de 20 e incluso 10 km.

No obstante, se ha verificado que la utilización de celdas menores a 10 km no mejora sustancialmente los resultados y que la hipótesis hidrostática incluida en los modelos de ecuaciones primitivas comienza a perder su validez, al tiempo que ciertos esquemas de parametrizaciones físicas deben ser reformulados a los fines de adaptarlos a celdas con resoluciones cercanas a los 5 km.

A este tipo de modelos que utilizan resoluciones de más de 5 km, y que ya no incluyen la hipótesis hidrostática en su formulación, se les suele llamar modelos de mesoescala, los cuales aún están en fase de investigación, y cuyo desarrollo definitivo conforma el gran reto de la predicción numérica del presente y años venideros.

En la Tabla 2-1 se presentan diferentes tipos de modelos matemáticos, clasificados de acuerdo al tamaño de la escala de los problemas que se quieren modelar.

Tabla 2-1. Clasificación de modelos numéricos según su escala espacial.

Tipo de modelo	Dominio Típico		Resolución horizontal Típica
	Horizontal	Vertical	
Microescala	200 x 200 m ²	100 m	5 m
Mesoescala (urbanos)	100 x 100 km ²	5 km	1 km
Regionales	1000 x 1000 km ²	10 km	10 km
Sinópticos (continentales)	3000 x 3000 km ²	20 km	100 km
Globales	65000 x 65000 km ²	20 km	500 km

Fuente: Seinfeld y Pandis, 1998.

2.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA EN COORDENADAS INERCIALES.

No es objeto de este trabajo el hacer una descripción detallada de las ecuaciones utilizadas para caracterizar el movimiento atmosférico, ni las técnicas numéricas utilizadas para resolverlas, no obstante, si se considera necesario hacer una breve presentación al respecto.

En un sistema de referencia inercial, la aplicación de la segunda ley de Newton sobre un “pequeño” elemento de fluido se expresa según:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g\delta_{i3} + f_{ri} \quad \text{con} \quad i=1, 2, 3 \quad (2.1)$$

Donde

$\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ es la velocidad, ρ es la densidad y p es la presión. El primer miembro de esta ecuación representa la derivada de la velocidad, mientras que el segundo término representa la suma de las fuerzas que actúan sobre el elemento de fluido sobre el que se realiza el análisis diferencial, de tal forma que el término:

$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ representa la fuerza producida por las diferencias de presión

$-g\delta_{i3}$ toma en cuenta la fuerza gravitatoria

mientras que $\vec{f}_r = (f_{r1}, f_{r2}, f_{r3})$ toma en cuenta las fuerzas de rozamiento que el resto del sistema ejerce sobre el elemento de fluido analizado.

Por otra parte, la ley de conservación de la masa postula que *“la masa de un elemento de fluido, cuando se sigue en su movimiento, se conserva”*, que matemáticamente se representa a través de la denominada ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = -\rho \text{div}(\vec{v}) \quad (2.2)$$

Además, a partir de las leyes termodinámicas descubiertas por Robert Boyle (1627-1691), Jacques Charles (1746-1823) y Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), se encontró que para gases en los que la densidad es pequeña, el producto de la presión por el volumen es prácticamente proporcional a su temperatura (lo que equivale a considerar el gas como un gas perfecto), por lo que si se considera que la atmósfera es aire seco que se comporta como un gas perfecto, se obtiene la siguiente relación entre la densidad (ρ), la presión (p) y la temperatura absoluta (T):

$$p = \rho RT \quad (2.3)$$

la cual es conocida como la ecuación de estado de los gases perfectos, donde R es la denominada constante de los gases para el aire seco, la cual se puede calcular mediante la ley de Dalton teniendo en cuenta los diferentes gases que constituyen el aire, así como sus respectivas proporciones, y que puede ser objeto de refinamiento a los fines de tener en cuenta la humedad del aire.

Igualmente, si se hace un balance de energía (primer principio de la termodinámica) en un elemento de fluido atmosférico donde se tenga en cuenta la ley de estado anterior, se obtiene la siguiente relación matemática:

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{RT}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) + Q \quad (2.4)$$

donde T es la temperatura absoluta, C_p es el calor específico a presión constante del aire seco, y Q es el aporte de calor por unidad de masa.

Finalmente se tiene la ecuación correspondiente a la concentración de vapor de agua, expresada según:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial q}{\partial x_j} = Q' \quad (2.5)$$

donde q es la humedad específica y Q' el aporte de vapor de agua por unidad de masa, mientras que los términos $\vec{f}_r$, Q y Q' representan las fuentes y los sumideros de cantidad de movimiento, de calor y de vapor de agua respectivamente, los cuales si no son tomados en cuenta dan origen a un sistema de ecuaciones representativo de una atmósfera adiabática y sin rozamiento (equivalente a hacer la hipótesis de que el sistema es aislado), que constituye la parte dinámica del modelo.

Si $\vec{f}_r$, Q y Q' son conocidos, se tiene que las ecuaciones 2.1 a 2.5 conforman un sistema de siete (7) ecuaciones con siete (7) incógnitas (la densidad, las tres componentes de la velocidad, la presión, la temperatura y la humedad específica) que conjuntamente con las condiciones iniciales y de contorno, se puede resolver mediante modelos y técnicas numéricas.

No obstante todavía existe un problema que se debe resolver, conformado por el hecho de que las ecuaciones del movimiento de los fluidos (ecuaciones 2.1 a 2.5) presentadas en los párrafos previos, sólo son válidas para un sistema de coordenadas inercial, mientras que en meteorología se utilizan como referencia sistemas ligados a la superficie de la Tierra, lo cual supone que se deben hacer alteraciones a la formulación original de las ecuaciones de movimiento.

Las alteraciones son dos (2): una debida a la rotación terrestre (fuerza de Coriolis), y la otra asociada a la forma esférica de la Tierra, lo cual hace que se tengan que reescribir las ecuaciones en un nuevo sistema de coordenadas que pueden ser coordenadas cartesianas o coordenadas esféricas.

Por lo general se utilizan las coordenadas cartesianas cuando se considera que la curvatura de la Tierra es pequeña, y las coordenadas esféricas cuando no se pueda despreciar esa curvatura.

Luego, las ecuaciones meteorológicas del movimiento en un sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) ligado a la superficie terrestre, se pueden expresar de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2-1.

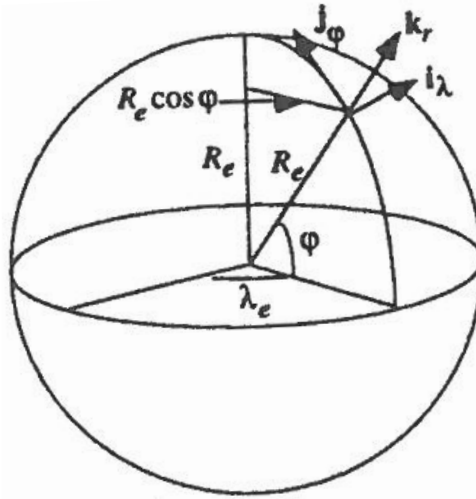


Figura 2-1. Sistema de coordenadas cartesianas y su relación con la superficie terrestre.

donde la coordenada x es la distancia medida sobre un paralelo terrestre (positiva al este), la coordenada y es la distancia medida sobre un meridiano terrestre (positiva hacia el norte), y z es la altura sobre la superficie terrestre.

Si se designan por u a la componente del viento en la dirección x , por v a la componente en la dirección y , y por w a la componente en la dirección z , se reescriben las ecuaciones (2.1 a 2.5) en función de estas nuevas variables, y se hace un análisis del orden de magnitud de los distintos términos de las ecuaciones, a los fines de despreciar los términos que tengan menor influencia de acuerdo con la escala de los fenómenos meteorológicos que se quieran estudiar, se obtiene para latitudes medias del hemisferio norte y a escala sinóptica, el siguiente sistema simplificado:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_v + f_{rx} \quad , \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_u + f_{ry} \quad , \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho, \quad (2.8)$$

$$p = \rho RT, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad (2.10)$$

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{RT}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) = Q \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = Q' \quad , \quad (2.12)$$

Donde (2.6) y (2.7) son las ecuaciones básicas de la conservación del momento de la meteorología dinámica, (2.8) es la ecuación hidrostática, (2.9) la ecuación de estado, (2.10) representa la ecuación de continuidad o de conservación de la masa, (2.11) la ecuación de la primera ley de la termodinámica y (2.12) es la ecuación del vapor de agua.

El término $f = 2\Omega \sin \varphi$ en las ecuaciones (2.6) y (2.7), donde Ω es la velocidad de rotación de la Tierra y φ la latitud, se denomina parámetro de Coriolis.

Las ecuaciones 2.6 a 2.12 conforman básicamente el sistema propuesto por V. Bjerknes (1904) a principios del siglo XX y que intentó resolver L.F. Richardson (1922) a finales de los años 1910, y constituyen una variante de las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes.

2.4 ECUACIONES DEL VIENTO GEOSTRÓFICO.

Los términos principales de las ecuaciones (2.6) y (2.7) para movimientos atmosféricos de gran escala, están representados generalmente por el gradiente de presión y el término de Coriolis. Si se considera que el movimiento es no acelerado (lo que equivale a tomar en cuenta sólo esos términos), y se desprecian los términos asociados a las fuerzas de rozamiento f_r , se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$v = \frac{1}{\alpha f} \frac{\partial p}{\partial x} \quad , \quad (2.13)$$

$$u = \frac{1}{\alpha f} \frac{\partial p}{\partial y} \quad , \quad (2.14)$$

donde α es la latitud de la tierra; las cuales se denominan ecuaciones de viento geostrófico, ya que representan el hipotético resultado de un perfecto balance entre la fuerza ocasionada por la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis) y la fuerza del gradiente de presión.

Tabla 3-1. Amenazas naturales con potencial de afectación de las áreas marino costeras de Venezuela.

Meteorológicas	Oceanográficas	Geológicas	Biológicas
- Precipitaciones extremas. - Ciclones tropicales. - Trombas marinas. - Sequías. - Rayos y relámpagos.	- Tsunamis. - Aumento del nivel del mar. - Corrientes circulares (Eddies). - Mar de fondo (Swell). - Resacas (Rip Currents). - Erosión de costas. - Olas internas. - Seiches.	- Sismos. - Licuefacción. - Deslaves submarinos. - Corrientes de turbidez. - Desplazamiento en fallas submarinas. - Desprendimientos de tierra.	- Marea Roja. - Emanaciones tóxicas. - Insectos.

3.1 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.

De acuerdo con la definición de “amenaza” incluida en el anexo 11.1 ésta se relaciona a la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural o antrópico en un determinado sitio, con una intensidad y duración determinada. Técnicamente se expresa como la probabilidad de que el fenómeno estudiado exceda un nivel de ocurrencia, con un nivel de severidad (intensidad) dado y durante un período determinado de tiempo.

Desafortunadamente, dada la complejidad usual que presentan los sistemas físicos donde el número de variables que condicionan el proceso es elevado, el estado del arte científico actual, no cuenta con la tecnología y técnicas necesarias para modelar con alta precisión a un buen número de dichos procesos, y por tanto, a los mecanismos generadores de cada una de las amenazas asociadas.

Por ello, en la mayor parte de los casos, la evaluación de la amenaza se desarrolla combinando el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico mostrado por las fuentes generadoras, utilizando para ello la información ocurrida en el pasado de eventos asociados a los sistemas físicos estudiados, para a partir de ellos, modelar dichos sistemas con algún grado de aproximación. Es decir, que para poder realizar una buena cuantificación de la probabilidad de ocurrencia de un evento de una intensidad y durante un período de exposición determinado, una condición necesaria es contar con información lo más completa posible, relacionada con el número de eventos y la intensidad de los mismos que ya ocurrieron en el pasado.

Por ejemplo, la amenaza asociada al paso de un huracán mayor (grado 3 o superior en la escala de Saffir-Simpson) sobre un determinado sector costero podría expresarse en términos del valor de la probabilidad que durante un lapso de tiempo de, supóngase 100 años, se pueda presentar un huracán que genere una sobre-elevación del nivel medio del mar superior a 1 m.

En este caso, el valor de la amenaza sería el valor de la probabilidad (un valor entre 0 y 1) donde un valor cercano a 1 significaría que existe una casi total certeza de que durante el lapso temporal de análisis (100 años para este ejemplo), se presente un evento que generará una elevación del nivel medio del mar igual o superior al nivel de sobre-elevación referencial que en el caso hipotético planteado fue de 1 m, mientras que si el valor obtenido fuese cercano a 0, se interpretaría como que la probabilidad de que un evento de las características estudiadas ocurriera en el lapso de tiempo estudiado, sería sumamente baja.

El valor de la amenaza así obtenida permitiría la toma de decisiones tales como, el diseño o modificación de las especificaciones técnicas metoceanicas que deberían cumplir las estructuras de producción, flotantes o ancladas directamente

al fondo marino, asociadas a la explotación de gas o petróleo, las cuales cada vez se emplazan a mayores profundidades y por tanto están sometidas a solicitaciones meteorológicas y oceanográficas, cada vez de mayor intensidad.

En otras palabras, evaluar la amenaza equivale a “pronosticar” la ocurrencia de un determinado fenómeno con base en: el estudio de su mecanismo generador y el monitoreo del sistema perturbador y/o registro histórico de eventos en el tiempo, pudiendo los pronósticos ser a corto, mediano y largo plazo, donde los pronósticos a corto plazo generalmente están basados sobre la búsqueda e interpretación de señales o eventos premonitorios.

El objetivo de estos pronósticos a corto plazo o predicciones, no es otro que el de determinar con certidumbre cuándo, dónde y con qué intensidad ocurrirá un determinado evento, siendo fundamentales para el desarrollo de sistemas de alerta cuya función es informar con suficiente antelación a la población presente en el área o estructura amenazada, acerca de la ocurrencia o inminente ocurrencia de un fenómeno peligroso.

Por otra parte, los pronósticos de mediano plazo se basan en la información probabilística que se tenga de los parámetros o indicadores característicos del fenómeno, y finalmente, los de largo plazo se sustentan en la determinación del evento máximo probable para un período o lapso de tiempo determinado y que normalmente está asociado a la vida útil que tengan las estructuras o con la planificación de un área potencialmente afectable.

3.2 SELECCIÓN DE LA AMENAZA A SER ESTUDIADA.

De las diferentes potenciales amenazas que pueden afectar a las áreas marino costeras de la República Bolivariana de Venezuela mostradas en la Tabla 3-1, se seleccionó para su estudio el aumento del nivel del mar asociado al paso de fenómenos meteorológicos tales como huracanes, por una determinada área.

Este hecho cobra particular importancia en momentos en que la exploración de yacimientos de gas costa afuera asociada a proyectos como el “*Proyecto Mariscal Sucre (PMS)*” y el “*Proyecto Corocoro*” en el litoral oriental al Norte de la Península de Paria, y los proyectos en los campos “*Perla*” y “*Barracuda*” en el golfo de Venezuela están en desarrollo, lo que implica la posibilidad futura de que se construyan instalaciones asociadas a este tipo de actividad, tales como plataformas de producción, tuberías submarinas de conducción, instalaciones costeras de almacenamiento, etc., las cuales en su diseño y construcción necesariamente deben considerar la influencia extrema que fenómenos como tormentas tropicales o huracanes pueden ocasionar sobre variables como: altura de oleaje, velocidad del viento, velocidades de flujo, cotas de inundación de las áreas costeras, etc. y que eventualmente pueden afectar a las mencionadas instalaciones.

El estudio de la amenaza seleccionada tendrá dos (2) vertientes de análisis:

1) Un análisis “general” que persiguió generar información climatológica general tanto en las costas venezolanas como en buena parte del mar Caribe.

2) Un análisis más particular que se concentró en la isla de Aves, que conforma la porción de terreno más septentrional de Venezuela, expuesta fuerte y continuamente a la acción de los huracanes, el cual permitió obtener y evaluar la respuesta de la isla ante la sobre-elevación del mar generada (“tormenta de marea”) por el paso de dichos fenómenos meteorológicos por el área estudiada.

4. TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE.

4.1 ASPECTOS GENERALES.

En el hemisferio occidental son los Estados Unidos de América (EUA) el país que ha llevado la batuta en lo referente al estudio sistemático del comportamiento de diferentes fenómenos meteorológicos tales como tornados, ciclones tropicales y huracanes, que afectan con frecuencia extensas zonas de dicho país, existiendo en la actualidad tres (3) centros nacionales operados por el Centro Nacional del tiempo ó “*National Weather Service*” (NWS por sus siglas en inglés). Ellos son:

- El Centro Nacional de Huracanes ó “*National Hurricane Center*” (NHC por sus siglas en inglés), ubicado en Miami, Florida.
- El Centro Nacional de Pronóstico de Tormentas Severas ó “*National Severe Storm Forecast Center*” (NSSFC por sus siglas en inglés), situado en Kansas City, Missouri
- El Centro Meteorológico Nacional ó “*National Meteorological Center*” (NWC por sus siglas en inglés) localizado cerca de Washington, DC.

Las áreas geográficas bajo su responsabilidad incluyen las regiones tropicales y subtropicales del Atlántico Norte y del Pacífico Nororiental, así como el mar Caribe, el golfo de México y áreas adyacentes.

A principios de 1900, el desarrollo de la radio constituyó un gran avance en lo que concierne tanto a la capacidad para recoger información, como a su posterior comunicación a los buques en el mar.

Estos avances no han parado desde entonces, pasando por la utilización de la red de radiosonda (1937), del reconocimiento aéreo (1944), hasta la utilización de satélites geoestacionarios, la colocación de un sinnúmero de aparatos de medición (boyas), etc., todo lo cual ha redundado en una mayor cantidad y calidad de información de las diferentes variables meteorológicas y oceanográficas relacionadas con la génesis, el desarrollo y el fin de los ciclones tropicales.

En la Figura 4-1 se presentan en forma resumida los principales hitos en lo que se refiere a la evolución de los sistemas de observación de ciclones en el Atlántico tropical.

4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA TEMPORADA DE HURACANES “PROMEDIO Ó TÍPICA”.

A los fines de presentar lo que sería “el cuadro de una temporada típica de huracanes en el océano Atlántico”, se ha querido incorporar en este documento información sobre las características y comportamiento que típicamente presenta una temporada de huracanes promedio, presentándose gráficos y tablas que muestren dicho comportamiento.

4.2.1 Trayectorias promedios por mes de los huracanes.

Es conocido que la temporada de huracanes en la cuenca Atlántica comienza oficialmente el día 01 de Junio y culmina el 30 de Noviembre de cada año.

El comportamiento, zona de origen y trayectorias de los sistemas meteorológicos que se forman a lo largo de estos seis (06) meses no es homogéneo, presentando características diferentes según sea la fase de avance que presente la temporada de huracanes.

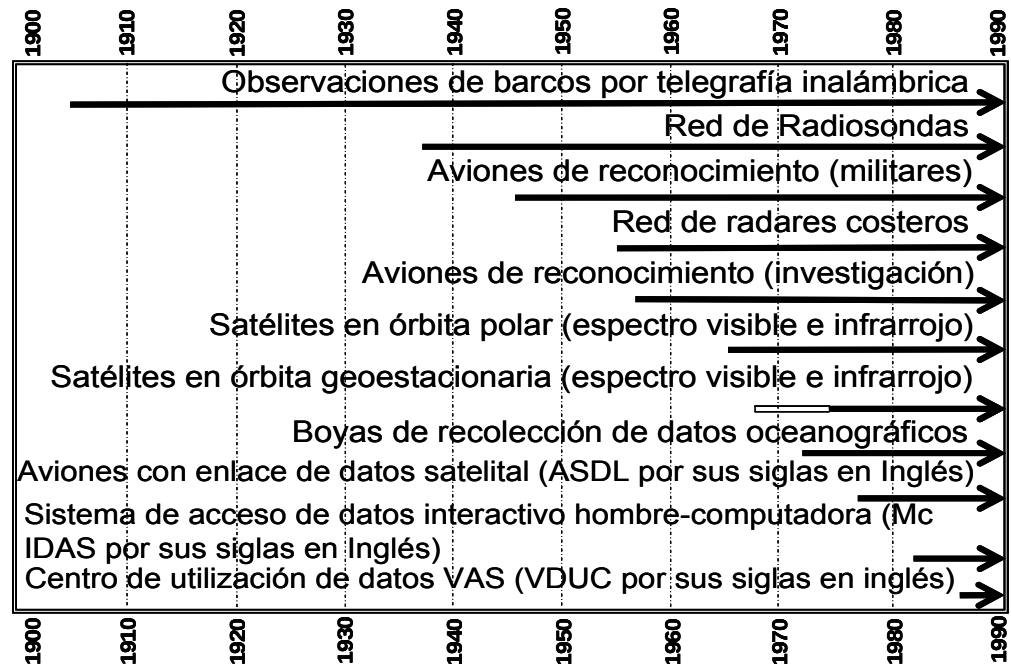


Figura 4-1. Hitos en los sistemas de observación de ciclones tropicales en el Atlántico tropical. Fuente: Sheets (1990) y modificado por el autor.

En la Figura 4-2 a la Figura 4-7, tomadas de la página web de NOAA <http://hurricanes.noaa.gov> y en la Tabla 4-1 se muestran tanto las zonas de origen, como las trayectorias promedios para los diversos meses que conforman la temporada de huracanes, las cuales permiten describir el progreso de una típica temporada de huracanes en términos del número total de sistemas tropicales y de huracanes producidos a través del año, recalándose que representan solamente condiciones promedio, ya que los huracanes se pueden originar en diversas localizaciones y desplazarse a lo largo de trayectorias muy diferentes al promedio.

A partir de la Figura 4-2 a la Figura 4-7 se puede observar como, tanto la zona de origen, como la trayectoria que siguen los fenómenos meteorológicos que se forman durante la temporada de huracanes, son función de la etapa (temprana, media o avanzada) en que se encuentre la temporada de huracanes, mientras que en la Figura 4-8 se muestra para el período 1851-2016, que el número promedio de fenómenos meteorológicos que se han formado en la cuenca Atlántica es de aproximadamente once (11), de los cuales casi cinco y medio (5,5) han sido huracanes, y de éstos, casi dos (2,0) han sido huracanes de categoría 3 o superior (vientos sostenidos comprendidos entre 111 y 130 mph en la escala Saffir/Simpson para huracanes).

Si bien estas cifras representan el “promedio histórico”, las mismas deben ser vistas y analizadas con cautela, dadas las grandes diferencias tecnológicas existentes entre mediados del siglo XIX y el presente (ver Bécemberg, 2013 y Vecchi y Knutson, 2008), las cuales influyen indudablemente tanto en el número de fenómenos meteorológicos

detectados, como en sus características (tormenta tropical, huracán, huracán mayor, etc.), y caracterización detallada (mediciones a intervalos de tiempo de la velocidad del viento).

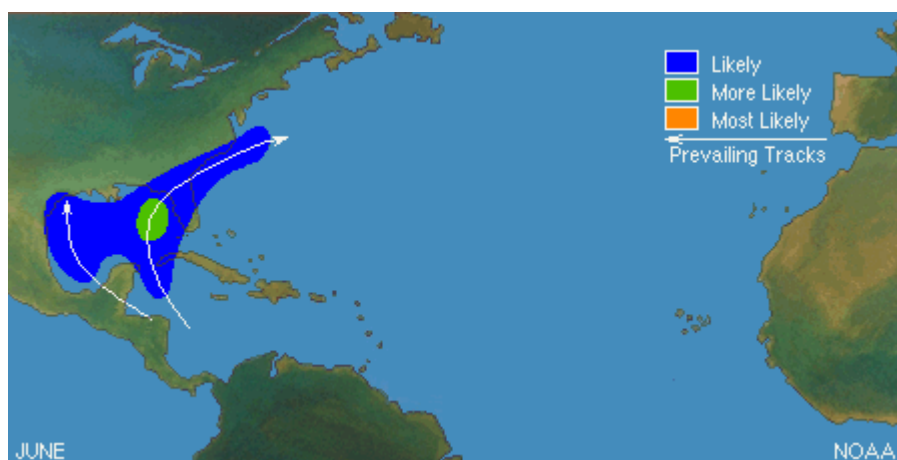


Figura 4-2. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Junio.

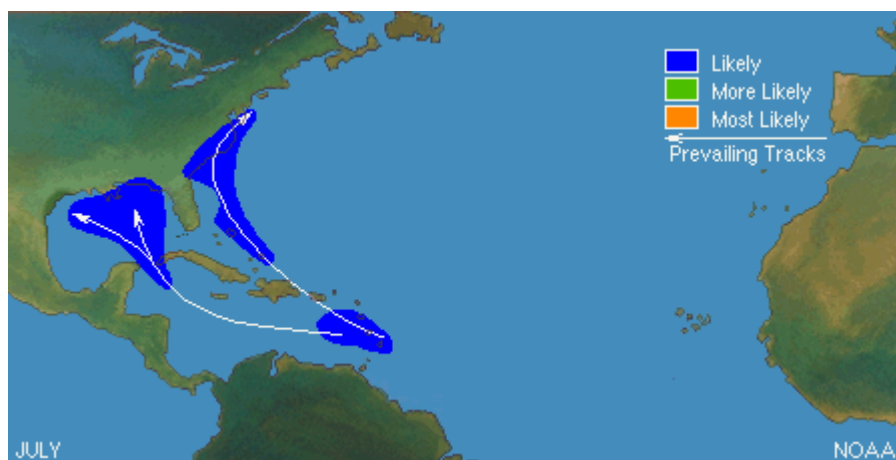


Figura 4-3. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Julio.

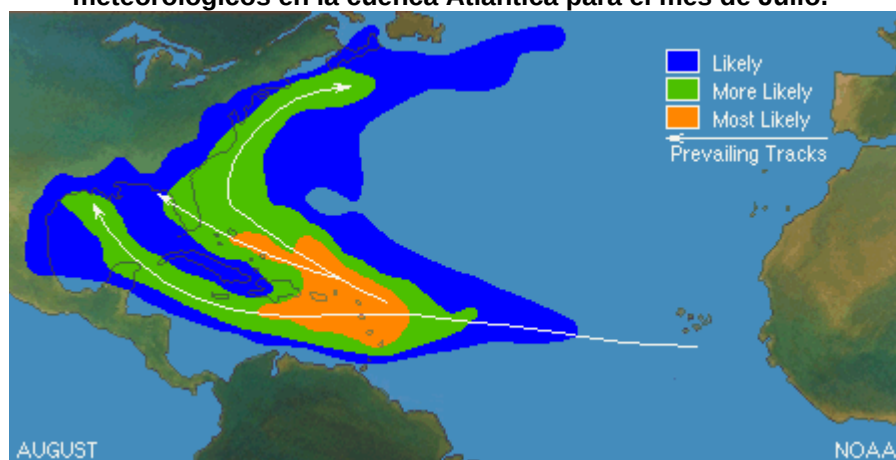


Figura 4-4. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Agosto.

Fuente de las figuras: NOAA (1).

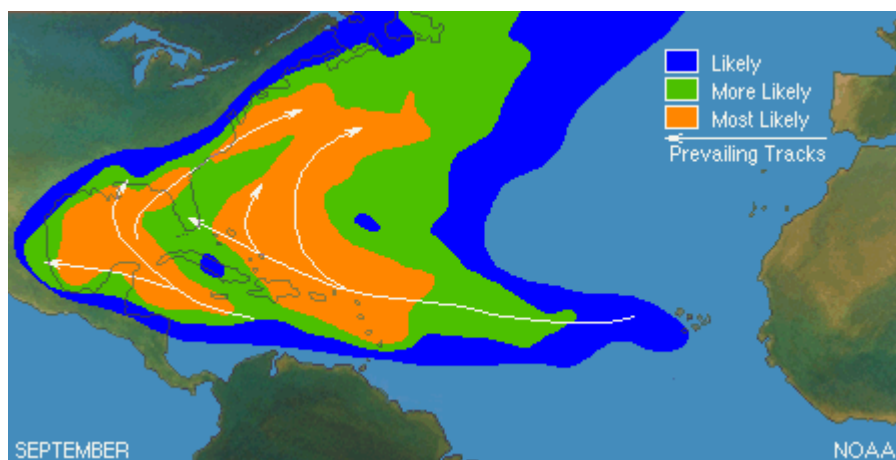


Figura 4-5. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Septiembre.

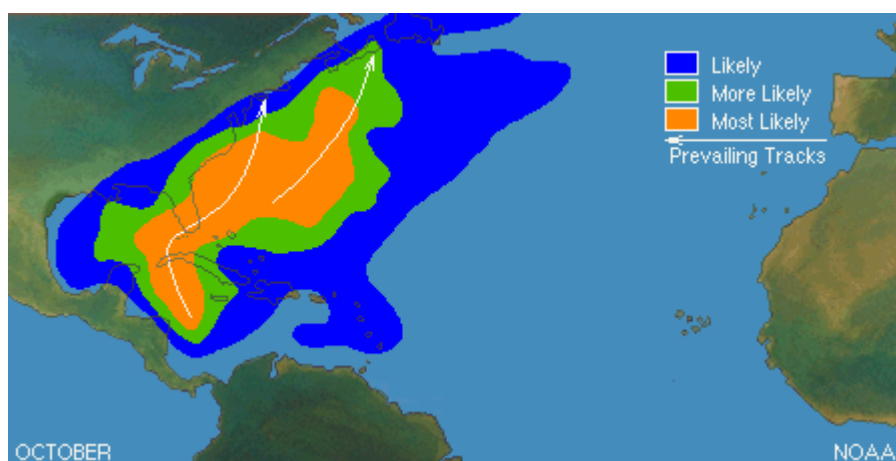


Figura 4-6. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Octubre.

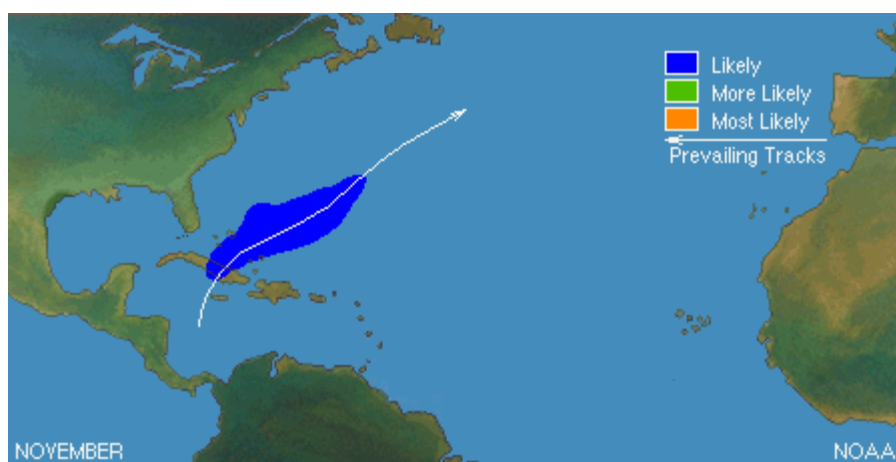


Figura 4-7. Zonas de origen y trayectorias promedio de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica para el mes de Noviembre.

Fuente de las figuras: NOAA (1).

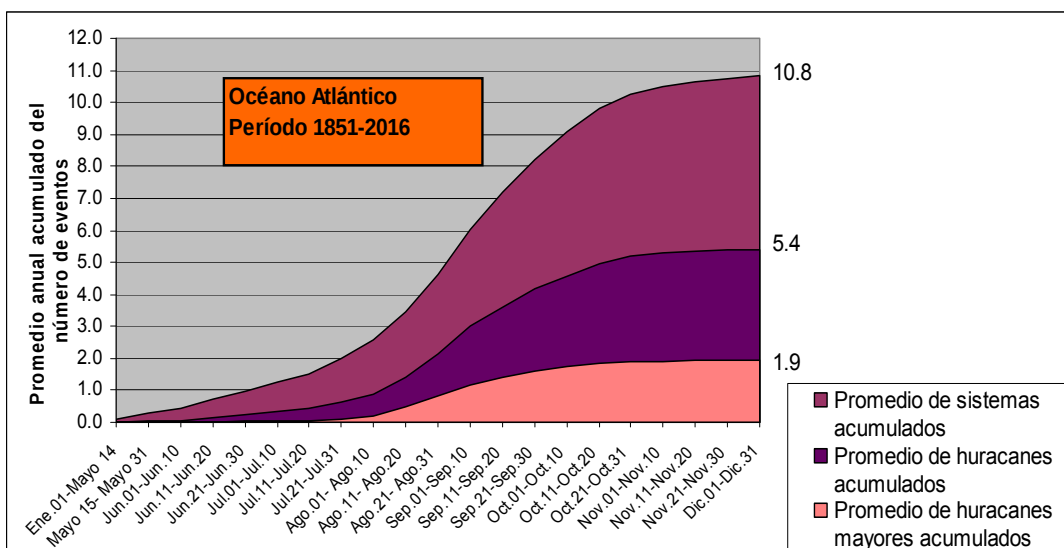


Figura 4-8. Promedio histórico de ocurrencia de fenómenos meteorológicos en la cuenca Atlántica (1851-2016).

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, en la Tabla 4-1 se muestra para el período 1944-2016, la evolución de una temporada de huracanes promedio en el Atlántico.

Tabla 4-1. Evolución promedio de una temporada de huracanes en la cuenca Atlántica (1944-2016).

Número	Sistemas identificados hasta la fecha	Huracanes	Huracanes mayores (Grado 3 o sup.)
1	Junio 15	Agosto 10	Agosto 31
2	Julio 15	Agosto 25	Septiembre 20
3	Julio 31	Septiembre 05	
4	Agosto 10	Septiembre 15	
5	Agosto 20	Octubre 05	
6	Agosto 26	Noviembre 20	
7	Septiembre 03		
8	Septiembre 08		
9	Septiembre 15		
10	Septiembre 20		
11	Septiembre 25		
12	Octubre 05		
13	Octubre 15		
14	Noviembre 10		

Fuente: elaboración propia.

A partir de esta tabla puede inferirse que en una temporada de huracanes promedio, se esperaría que para mediados del mes de Septiembre hubiesen ocurrido e identificado nueve (09) sistemas o fenómenos meteorológicos, de los cuales cuatro (04) serían huracanes, y de estos, dos (02) huracanes serían de categoría 3 o más intenso.

4.3 BASE DE DATOS UTILIZADA Y SUS LIMITACIONES.

La base de datos utilizada para realizar los diferentes análisis y tendencias asociados con la acción de los fenómenos meteorológicos (depresiones y tormentas tropicales y de los huracanes), es la base de datos de huracanes del Atlántico (conocida como HURDAT), la cual incluye datos desde 1851.

No obstante, dado que las tormentas tropicales y los huracanes pasan gran parte de su “vida” sobre el océano abierto (teniéndose que inclusive algunos de ellos nunca tocan tierra) muchos de los sistemas se “perdieron”, es decir, nunca fueron detectados durante el lapso de tiempo comprendido entre finales del siglo XIX y los comienzos del siglo XX (Vecchi y Knutson, 2008), debido a que hasta ese momento la fuente principal de datos provenía de las observaciones hechas desde buques que navegaban (por obra de la casualidad) cerca del área de ocurrencia del evento.

Tal como se dijo en el aparte 4.1, por mucho tiempo el pronóstico de huracanes y programas de alerta estuvieron seriamente obstaculizados por la falta de observaciones y la capacidad para transmitir dichas observaciones y advertencias entre los entes pronosticadores y los lugares que pudieran verse afectados, lo cual se hacía hasta finales del siglo XIX a través del telégrafo, a través del cual se transmitían las observaciones diarias de algunas pocas localizaciones en el mar Caribe, el Atlántico y la costa del golfo.

A comienzos del siglo XX, el desarrollo de la radio permitió un gran avance en la capacidad de recolectar y comunicar las informaciones desde o hacia los buques en el mar.

Esto, sin bien facilitó mucho el seguimiento, seguía dejando todavía a cerca de la mitad de la cuenca Atlántica sin cobertura (Sheets, 1990), situación que mejoró a partir de 1944 cuando comenzó un sistemático reconocimiento aéreo para monitorear tanto a los ciclones tropicales, como a cualquier perturbación que tuviera el potencial para convertirse en tormenta tropical o en un huracán.

El gran salto en lo que respecta a las herramientas de observación de la meteorología tropical fue sin duda la puesta en operación de los satélites meteorológicos geoestacionarios, los cuales en conjunto con la colocación de un gran número de boyas de medición, permiten en la actualidad la obtención de más y mejores datos de los distintos parámetros meteorológicos y oceanográficos relacionados con la génesis y desarrollo de los huracanes.

En el anexo 11.2 se presentan datos de importancia obtenidos a partir de la base de datos HURDAT, que sirvieron para distintos análisis que se realizaron en la búsqueda del establecimiento de correlaciones y tendencias entre la ocurrencia de los eventos “El Niño” y “La Niña” y las características de las temporadas de huracanes en el Atlántico y su influencia sobre el dominio de estudio.

4.4 EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS). CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES E ÍNDICES DE CUANTIFICACIÓN DEL FENÓMENO.

Numerosas investigaciones han sido desarrolladas por un sin número de investigadores sobre el tema. En Bécemberg (2013) y en otras múltiples publicaciones se presenta una amplia descripción al respecto.

Entre dichas investigaciones destacan las hechas por Quinn y Neal (1992) quienes hicieron una exhaustiva recopilación histórica de todos los eventos

climáticos asociados a la fase caliente de la Oscilación del Sur (correspondiente a un evento “El Niño”), las realizadas por Bjerknes (1966 y 1969), sobre el debilitamiento de los flujos de viento provenientes del este en el océano Pacífico ecuatorial oriental, conjuntamente con presiones anómalamente bajas en el océano Pacífico oriental y anormalmente altas en el océano Pacífico occidental que reducen el afloramiento de aguas frías y sirven como catalizador para el incremento de la temperatura superficial del mar, y otras publicaciones como las de Horel y Wallace (1981), Rasmusson y Carpenter (1982 y 1983), Yarnal (1985), Yarnal y Kiladis (1985) y Deser y Wallace (1987).

En la Figura 4-9 y en la Figura 4-10 se presenta el record climático histórico de los eventos “El Niño” extraído del “*World Data Center for Paleoclimatology and NOAA Paleoclimatology Program*” (tomado de: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate1500ad/ch32.txt>) y (Quinn y Neal, 1992).

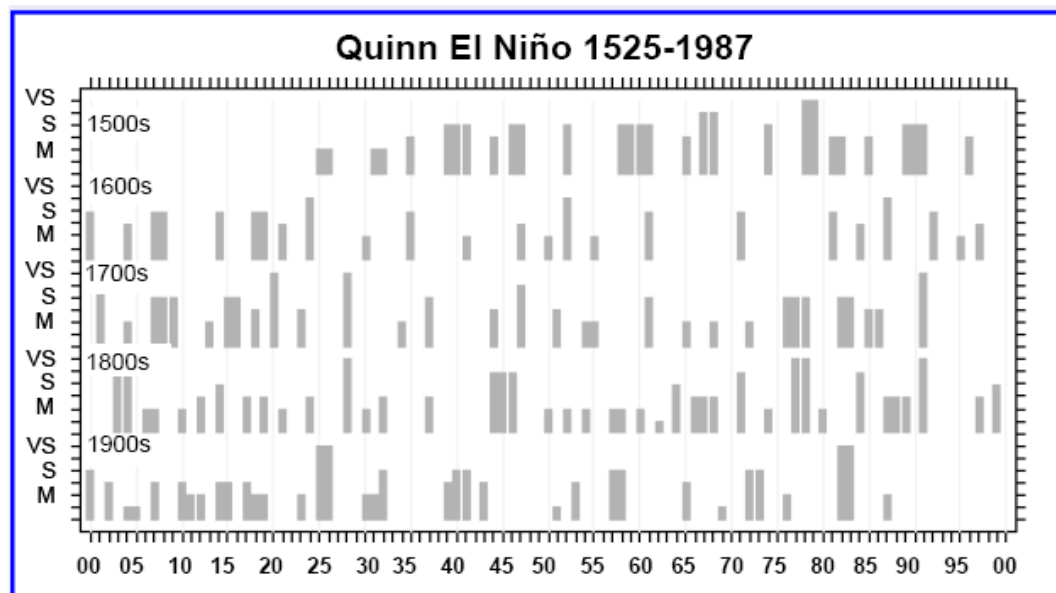


Figura 4-9. Eventos “El Niño” para el período 1525-1987.

Fuente: <http://jisao.washington.edu/data/quinn/> y modificado por el autor

Donde los eventos “El Niño” están categorizados como
 0 Neutral o frío
 1 Moderado débil (M-)
 2 Moderado
 3 “Moderado +”
 4 Fuerte
 5 “Fuerte +”
 6 Muy Fuerte

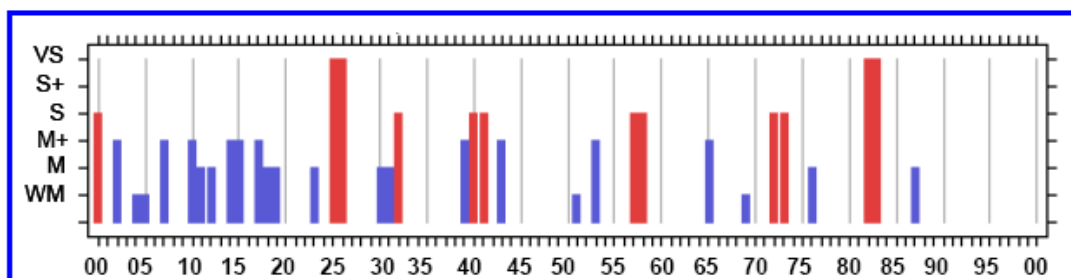


Figura 4-10. Eventos “El Niño” para el período 1900-1987.

Fuente: <http://jisao.washington.edu/data/quinn/> y modificado por el autor

También es bien conocida su relación con las fluctuaciones de los niveles de agua (Amarasekera et al, 1997), la variabilidad en las precipitaciones: Ropelewsky y Halper, (1987), Aceituno y Montesinos (1992), Schongart y Junk (2007), Chavassee y Seoane, (2009), así como alteraciones en el régimen de caudales de ríos ubicados en las cuencas tropicales: García y Mechoso (2005) y Marengo et al (2010).

Valiente (1999), presenta interesantes resúmenes de las alteraciones oceánicas y atmosféricas generadas por el ENOS, tanto las circunscritas al ámbito del Pacífico ecuatorial, como a nivel global a través de teleconexiones que modifican los patrones del tiempo atmosférico, oscilando entre dos (2) fases: una fría y una fase cálida que dependen de la fuerza o debilidad de los vientos alisios (ver detalles en el anexo 11.3).

4.4.1 Características principales.

Actualmente, diversas investigaciones de índole oceanográfica y meteorológica demuestran la existencia de eventos climáticos de escala global relacionados con las interacciones inestables entre dos (2) grandes sistemas: el oceánico y el atmosférico.

Uno de los eventos de interacción océano-atmósfera de mayor importancia, es el conocido en el medio científico con el nombre de “El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)”, comúnmente conocido como “El Niño”, el cual no se desarrolla de forma periódica, haciendo su aparición a intervalos irregulares que oscilan aproximadamente entre los 3 y 7 años.

De manera muy resumida, “El Niño Oscilación del Sur (ENOS)”, corresponde a un evento climático que de forma natural se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central, consistente de dos (2) fases: una cálida (evento “El Niño”) y una fría (evento “La Niña”), cuyas repercusiones a nivel climático son importantísimas, pudiendo inclusive llegar a ser catastróficas (Maturana et al, 2004).

Hasta los momentos no se conoce a ciencia cierta cuál o cuales son las condiciones que fungen como catalizadores para activar el comienzo de un ciclo ENOS, aún cuando las continuas investigaciones si han podido identificar algunos de los signos que preceden al surgimiento de uno de estos eventos en sus componentes oceánica y atmosférica.

Se tiene entonces que la componente oceánica del ciclo ENOS se caracteriza por la aparición de fuertes anomalías positivas (durante la fase cálida) o negativas (si se está en la fase fría) de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico, estando las anomalías positivas de la temperatura asociadas al hundimiento de la termoclina y reducción de la surgencia costera, teniéndose el efecto contrario si las anomalías fuesen negativas.

La fase cálida del ENOS, conocida como “El Niño”, se caracteriza por un debilitamiento a gran escala de la intensidad de los vientos alisios y por un aumento en la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial del este central, que se manifiesta a través de anomalías positivas de la TSM, que se obtienen por la diferencia entre el valor observado y la media climatológica del lugar donde se realice la medición.

Adicionalmente se pueden observar presiones atmosféricas a nivel del mar muy por encima de los valores normales en el lado oeste del Pacífico tropical y en algunas regiones del Océano Índico, y por el contrario, presiones atmosféricas a nivel del mar inusualmente bajas hacia el sureste del Pacífico tropical.

En el caso de la fase fría del ENOS, conocida como “La Niña”, se presentan condiciones anómalas y opuestas a las que ocurren en un evento “El Niño”, presentándose una acumulación de aguas cálidas en el Pacífico occidental debido a la intensificación del régimen de los vientos alisios que soplan desde el Este, así como una intensificación del funcionamiento de la “Celda de Walker”, mientras que el “traslado” de un gran volumen de aguas cálidas hacia el Oeste con el consecuente aumento de la temperatura superficial del mar en ese sector, permite el fortalecimiento del fenómeno de surgencia en el sector del Pacífico oriental, frente a las costas de Ecuador, Perú y el norte de Chile.

En el anexo 11.3 se muestran esquemas que caracterizan las condiciones antes mencionadas, para las dos (2) fases del ENOS.

4.4.2 Índices de cuantificación del fenómeno.

Las definiciones de lo que constituye un año de “El Niño” ó uno de “La Niña” pueden variar, dependiendo del índice y la base de referencia que se utilice para cuantificar el fenómeno.

Hoy en día se puede afirmar que “El Niño” y “La Niña” son fenómenos que existen hace miles de años, que resultan del efecto combinado de muchos factores entre los cuales están; la rotación de la tierra, la redistribución de la energía recibida desde el sol y la disposición que tienen los continentes en relación con los mares, la cual data desde hace unos 50 millones de años (Araya, 2004).

Es por ello que cualquier caracterización del fenómeno de “El Niño” o “La Niña”, pasa por la unificación internacional acerca de cual de los diferentes índices existentes (ver Tabla 4-3 y Figura 4-12) se debe utilizar para caracterizar mejor el fenómeno en las diferentes regiones del océano Pacífico donde se presenta el fenómeno de “El Niño” (ver Tabla 4-2 y Figura 4-11).

Guevara, J.M. (2008) hace una buena recopilación de los diferentes índices utilizados para caracterizar al ENOS así como las ecuaciones que sirven para calcular dichos índices.

Tabla 4-2. Regiones o zonas Niño y sus dimensiones e índices asociados.

Región	Latitud (°)	Longitud (°)	Índices ENOS
Región Niño 1+2 (N1+2)	0° a 10° S	80° W a 90° W	N1+2
Región Niño 3 (N3)	5° N a 5° S	90° W a 150° W	N3
Región Niño 4 (N4)	5° N a 5° S	150° W a 160° E	N4
Región Niño 3.4 (N3.4)	5° N a 5° S	120° W a 170° W	N3.4 o N3+4

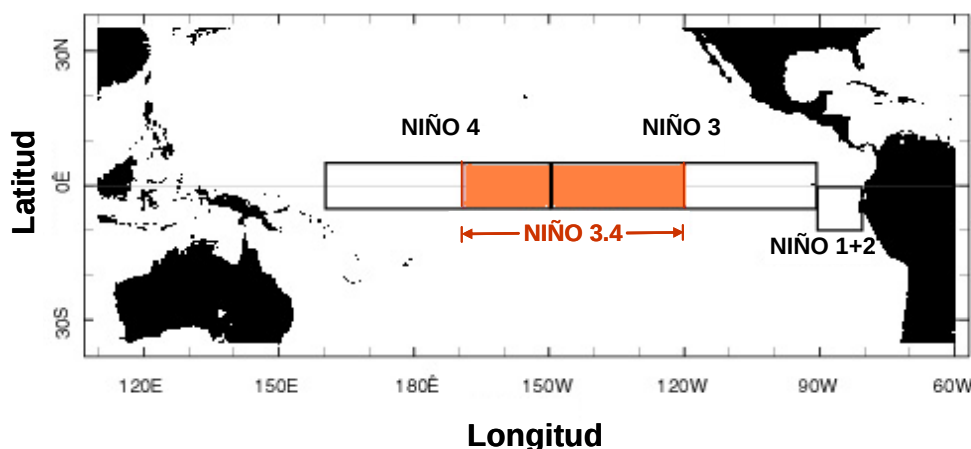


Figura 4-11. Regiones Niño en el Océano Pacífico ecuatorial. Fuente: IRI (2007).

Fuente: IRI (2007)

Tabla 4-3. Diferentes índices utilizados para caracterizar y cuantificar los eventos ENOS ("El Niño" o "La Niña".

Institución o Investigador	Índice	Variable de análisis	Período de referencia	Método de suavización ó normalización	Criterio (secuencia) para que ocurra un evento "El Niño"	Criterio (secuencia) para que ocurra un evento "La Niña"
JMA	JMA	ASTM	1971 / 2000	Media móvil de 5 meses	6 índices $\geq +0,5^{\circ}\text{C}$	6 índices $\leq -0,5^{\circ}\text{C}$
Trenberth	Niño 3	ASTM	1950 / 1979	Media móvil de 5 meses	6 índices $\geq +0,4^{\circ}\text{C}$	6 índices $\leq -0,4^{\circ}\text{C}$
	Niño 3.4	ASTM	1950 / 1979	Media móvil de 5 meses	6 índices $\geq +0,4^{\circ}\text{C}$	6 índices $\leq -0,4^{\circ}\text{C}$
NOAA	ONI	ASTM	1971 / 2000	Media móvil de 3 meses	5 índices $\geq +0,5^{\circ}\text{C}$	5 índices $\leq -0,5^{\circ}\text{C}$
	1+2; 3, 3.4 y 4	ASTM	1950 / 1980	Media móvil de 3 meses	5 índices $\geq +0,5^{\circ}\text{C}$	5 índices $\leq -0,5^{\circ}\text{C}$
SCOR WG 55	SCOR	ASTM	¿ ?	S (Desviación estándar)	4 índices = +1S en 4 estaciones peruanas	4 índices = -1S en 4 estaciones peruanas
Purca	IOP	ASTM	¿ ?	Normalización	¿ ?	¿ ?
Trenberth y Stepaniak	TNI	ASTM	1950 / 1979	Media móvil de 5 meses Normalización	Expresa evolución de "El Niño"	Expresa evolución de "El Niño"
	Ind. 3.4	ASTM	1950 / 1979	Media móvil de 5 meses Normalización	6 índices $\geq +0,4^{\circ}\text{C}$	6 índices $\leq -0,4^{\circ}\text{C}$
NOAA BOM Trenberth JMA	IOS	P	1951 / 1980	Normalización	Varía según el autor Tendencia a emplear clases de índices térmicos.	Varía según el autor Tendencia a emplear clases de índices térmicos.
	IOS	P	1933 / 1992	Normalización		
	IOS	P	1951 / 1980	Normalización		
	IOS	P	1971 / 2000	Normalización		
Wolter	MEI	P, Tm, Ta, V, N	1950 / 1993	Normalización	Sucesión = $+0,5^{\circ}\text{C}$	Sucesión = $-0,5^{\circ}\text{C}$
Kiladis y Von Loon	ASTM	ASTM	1951 / 1979	Normalización	3 trimestres + y	3 trimestres - y
	IOS	[T-D]	1951 / 1979	Media móvil de 5 meses Normalización Media móvil de 5 meses	1 trimestre = $+0,5^{\circ}\text{C}$ IOS - y un trimestre < -1	1 trimestre = $-0,5^{\circ}\text{C}$ IOS + y un trimestre > 1
Ropelewski y Halpert	IOS	[T-D]	1951 / 1980	Normalización Media móvil de 5 meses	5S = -0,5	5S = +0,5
Deos	Niños A, 1+2A, 3A, 3.4A, 4A	Nivel del mar	7 cm.	Normalización	¿ ?	¿ ?

Ejemplo de interpretación: Primera fila: El índice es JMA del Servicio Meteorológico del Japón. Emplea la anomalía de la temperatura superficial del mar en relación con la media del período 1971-2000. Es una anomalía móvil de 5 meses. Un evento ENOS ocurre cuando hay una secuencia de por lo menos 6 índices consecutivos, cada uno igual o mayor que $+0,5^{\circ}\text{C}$ (un evento "El Niño") o menor que $-0,5^{\circ}\text{C}$ (un evento "La Niña").
 Abreviaturas: ASTM (Anomalía de la temperatura superficial del mar), P (Presión atmosférica), Tm (Temperatura del mar), Ta (Temperatura del aire), V (Velocidad del Viento), N (Nubosidad) y S (Desviación estándar del índice IOS suavizado 5 meses)
 Deos (Department of Earth Observation and Space Systems of the Faculty of Aerospace Engineering Delf, Netherlands).

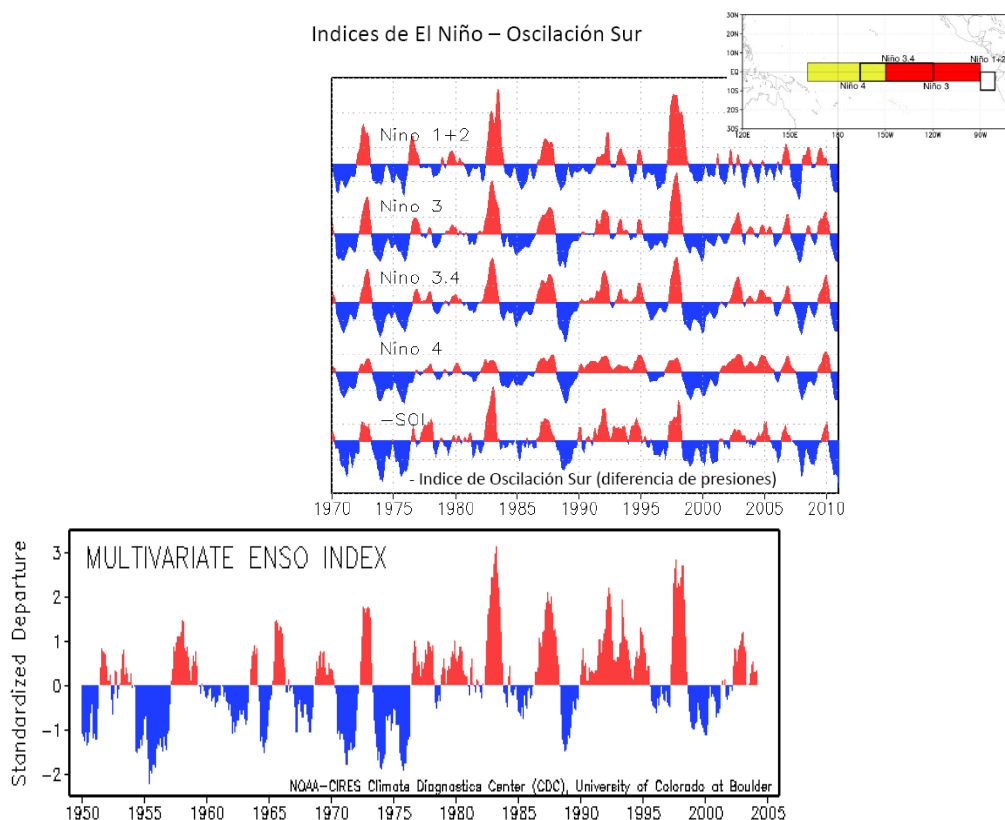


Figura 4-12. Recopilación de diferentes índices utilizados para caracterizar eventos “El Niño”.

Fuente: http://www.research.noaa.gov/climate/t_elnino.html y modificada por el autor

Para los efectos de este trabajo, se seleccionó el índice oceánico El Niño (ONI), que refleja y representa el criterio del Centro de Predicción Climática (NCEP) de la NOAA, conocido corrientemente como El Niño Oceánico (“*Oceanic Niño Index*”), que se calcula a partir del promedio móvil de la anomalía de la temperatura superficial del mar con respecto al período de referencia 1971-2000, de tres (3) meses consecutivos: la anomalía del mes, la anomalía del mes precedente y la anomalía del siguiente mes, en la región Niño 3.4 (5° N a 5° S y 120° W a 170° W), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Índice ONI del mes} = \left(\frac{A_{t-1} + A_t + A_{t+1}}{3} \right) \quad (4.1)$$

Donde A_t es la anomalía de la temperatura superficial del mar (ASTM) del mes de cálculo y A_{t-1} y A_{t+1} , son las anomalías de la temperatura superficial del mar del mes anterior y del mes posterior, respectivamente, al mes donde se quiere calcular el índice.

La base de datos del índice ONI incluye datos desde el año 1950 hasta Agosto de 2017 (ver anexo 11.4), y a partir de la misma se determinaron en buena medida los años donde ocurrieron eventos “El Niño” y “La Niña”, siendo complementados para los años anteriores a 1950 con la información contenida en la base de datos histórica de Quinn (1992).

4.4.3 Sistemas de clasificación de eventos “El Niño” y “La Niña”

La bibliografía especializada reporta diferentes clasificaciones de los eventos “ENOS”, muchas de las cuales son discrepantes entre sí, especialmente a la hora de clasificar la intensidad del evento, razón por lo que hasta los momentos es prácticamente imposible tomar un criterio único de clasificación que tenga aceptación universal.

En este trabajo se considerará el criterio adoptado por la NOAA según el cual, un evento “El Niño” ocurre si en la región Niño 3.4 se presenta una secuencia de al menos 5 índices ONI, cada uno con una magnitud mayor o igual a $0,5^{\circ}\text{C}$, y un evento Niña cuando se presenta una secuencia en la región Niño 3.4, de al menos 5 índices ONI, cada uno con una magnitud igual o menor a $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Otra de las fuentes bibliográficas consultadas, es la página web de “Golden Gates Weather Services”, <http://ggweather.com/enso/oni.htm> que es una empresa consultora de servicios meteorológicos” que goza de un buen reconocimiento en el área del estado de California (EUA).

En dicha página se clasifica la intensidad de los eventos ENOS de acuerdo con los siguientes criterios, y según los cuales se presenta en la Tabla 4-4 la clasificación de eventos “El Niño” y “La Niña”.

- Eventos débiles, cuando se presentan valores puntuales de anomalías comprendidas entre $0,5$ y $1,0^{\circ}\text{C}$.
- Eventos moderados, cuando se presentan valores puntuales de anomalías comprendidas entre $1,0$ y $1,5^{\circ}\text{C}$.
- Eventos fuertes: cuando se presentan valores puntuales de anomalías comprendidas entre $1,5^{\circ}\text{C}$ y $2,0^{\circ}\text{C}$.
- Eventos muy fuertes: cuando se presentan valores puntuales de anomalías superiores a $2,0^{\circ}\text{C}$.

Tabla 4-4. Cronología de eventos “El Niño” y “La Niña”. Lapso: 1950-2016.

Intensidad y año de ocurrencia de eventos "El Niño"				Intensidad y año de ocurrencia de eventos "La Niña"		
Débil	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1951-52	1963-64	1957-58	1982-83	1950-51	1955-56	1973-74
1952-53	1986-87	1965-66	1997-98	1954-55	1970-71	1975-76
1953-54	1987-88	1972-73	2015-16	1964-65	1998-99	1988-89
1958-59	1991-92			1967-68	1999-00	
1968-69	2002-03			1971-72	2007-08	
1969-70	2009-10			1974-75	2010-11	
1976-77				1983-84		
1977-78				1984-85		
1979-80				1995-96		
1994-95				2000-01		
2004-05				2011-12		
2006-07				2016-17		

Fuente: <http://ggweather.com/enso/oni.htm> y modificada por el autor

5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO NORTE (LAPSO: 1851-2016).

A los fines de generar mapas de probabilidades de excedencia para diferentes condiciones, se recalcularon en base a los datos de la base HURDAT, diferentes parámetros que permitieron caracterizar a las temporadas de huracanes en el Atlántico Norte.

La condición principal que fue tomada en consideración para agrupar a las diferentes temporadas de huracanes fue si en cada año se presentaban condiciones que permitiesen afirmar que en ese año ocurrió el fenómeno de “El Niño”, “La Niña”, o fuese un año “Neutral”.

Becemberg (2013) y otros autores han evidenciado que la intensidad de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte, expresada en función del número anual de tormentas, está directamente relacionada con la presencia de condiciones “El Niño”, “La Niña” o neutras en el océano Pacífico ecuatorial, teniéndose que en los años “Niño” el número de fenómenos meteorológicos que se presentan en la cuenca Atlántica es sensiblemente inferior (50%) al número de fenómenos que se presentan en los años “Niña”, pasando de 18 fenómenos en el último caso, a 9 fenómenos en los años “Niño” (un análisis más detallado se presenta en el aparte 5.2).

Una vez determinados cuales años corresponden a años “Niño”, “Niña” o “Neutral”, se generaron mapas de probabilidades del dominio de estudio, para estas tres (3) condiciones.

5.1 INTENSIDAD DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES.

En el trabajo de Bécemberg (2013) una parte importantísima consistió en cuantificar e identificar si realmente las temporadas de huracanes se estaban intensificando o no, independientemente de que se tuviera la percepción de que efectivamente se están incrementando, ya que este hecho incide directamente en la probabilidad de riesgo al que está expuesta una determinada área.

Haciendo uso de las estadísticas de la base de datos de la NOAA, se hizo un análisis de lo que han sido las características de las temporadas de huracanes desde 1851 hasta 2016, para diferentes períodos de tiempo seleccionados de acuerdo con la aparición de técnicas o equipos que influyeron en la cantidad, calidad y precisión de los eventos medidos, evitando así que las estadísticas reportadas mezclen entre sí los distintos grupos de datos medidos, permitiendo de esta manera una mejor interpretación de los mismos.

En la Tabla 5-1 se presentan valores promedios por décadas a partir de 1940 hasta el presente, así como el promedio de la totalidad de los datos entre 1851 y 2016 de los siguientes parámetros relacionados con la actividad ciclónica del Atlántico: número de tormentas, duración promedio y total de las tormentas e intensidad de las mismas (calculada como la sumatoria del cuadrado de las velocidades registradas durante el desarrollo de cada evento monitoreado), mientras que en la Tabla 5-2 se presentan los mismos parámetros pero agrupados en períodos de tiempo específicos, con el objetivo de tratar de separar los datos de acuerdo a la “calidad” de los mismos, calidad que ha ido aumentando en el tiempo debido a los grandes avances tecnológicos de los equipos utilizados para monitorear los eventos.

Tabla 5-1. Cambios por décadas en la actividad ciclónica en el Atlántico Norte.

	Periodo 1851-2016	Periodo 1940-1949	Periodo 1950-1959	Periodo 1960-1969	Periodo 1970-1979	Periodo 1980-1989	Periodo 1990-1999	Periodo 2000-2009	Periodo 2010-2016
Número de tormentas promedio	10.8	9.8	10.4	13.1	20.0	14.6	13.3	17.3	15.9
Duración promedio (Días)	6.5	6.1	7.1	7.4	5.0	5.7	6.8	6.9	6.5
Intensidad promedio (nudos ²)	4328.6	3920.1	5049.0	5360.3	3812.0	4208.8	4245.9	4196.6	3409.9
Índice ECA promedio	94.4	84.2	130.4	121.6	65.5	82.3	116.0	143.5	110.1

Tabla 5-2. Comparación de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte para períodos específicos de tiempo.

	Periodo 1851-2016	Datos a partir de observaciones de barcos 1851-1904	Observaciones de barcos con utilización de la radio 1905-1943	Comienzo de reconocimiento aéreo 1944-1965	Comienzo de observaciones con satélites 1966-2016	Periodo 1980-1989	Periodo 1990-1999	Periodo 2000-2009	Periodo 2010-2016	Porcentaje de cambio (%) entre periodo 2000-2009 y 2010-2016
Número de tormentas promedio	10.8	7.6	8.4	9.8	16.5	14.6	13.3	17.3	15.9	-8.1
Duración promedio (Días)	6.5	6.4	7.0	7.1	6.2	5.7	6.8	6.9	6.5	-5.8
Intensidad promedio (nudos ²)	4328.6	4425.8	4132.8	5033.9	4095.2	4208.8	4245.9	4196.6	3575.8	-14.7
Índice ECA promedio	94.4	82.9	84.2	117.0	104.6	82.3	116.0	143.5	110.1	-23.3

El análisis de la Tabla 5-1 y de la Tabla 5-2 evidencia que el único parámetro relacionado con los huracanes que ha experimentado un aumento significativo a partir de la década de los 70, es el relacionado con el número de eventos anuales, el cual pasó de poco más de diez (10) eventos en la década de los años 50, a unos trece (13) eventos en la década de los 90, dando un salto cuantitativo en el siglo XXI en el cual el promedio anual de eventos ha sido de diez y seis (16) eventos, mientras que la duración promedio de los eventos para cada período de tiempo analizado y intensidad promedio en cada temporada de huracanes no experimentaron cambios significativos.

De hecho, el análisis de la Tabla 5-2 parece indicar que los diversos parámetros analizados experimentan variaciones cíclicas, más que una tendencia clara a aumentar o disminuir.

5.2 RELACIÓN ENTRE LA OCURRENCIA DE EVENTOS “EL NIÑO” O “LA NIÑA” Y LA INTENSIDAD DE LA TEMPORADA DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO.

Tal y como se mencionó previamente, existe una altísima correlación entre la intensidad de las temporadas de huracanes en el Atlántico, y la ocurrencia de eventos “El Niño” o “La Niña” en el Pacífico ecuatorial, siendo también de importancia el determinar con cual de los diferentes índices existentes (ver Tabla 4-3) se determinaría si las condiciones existentes corresponden a un evento “El Niño”, “La Niña” o a condiciones neutras.

Para comprobar esto, se decidió utilizar las estadísticas disponibles del índice ONI utilizado por la NOAA, para realizar los análisis y demostrar matemáticamente la relación entre los valores de dicho índice, la intensidad de las temporadas de huracanes, y la ocurrencia de eventos “El Niño” o “La Niña”, el cual si bien es un índice basado únicamente en el análisis de un componente oceanográfico (anomalías de la temperatura superficial del mar) tiene una amplia base de datos, y de fácil acceso.

5.2.1 Predicción del índice ONI promedio anual a partir de su relación con el índice ONI de un mes en particular.

Para el establecimiento y categorización de cuanto por encima o por debajo de los valores promedios de la temperatura superficial del mar presentaba la región Niño 3.4, de acuerdo con el índice ONI, no se tomaron los valores individuales mensuales de dicho índice reportados por la NOAA, tomándose en cambio el promedio anual del mencionado índice para los fines de los cálculos, correlaciones y categorización de las temporadas de huracanes en el Atlántico.

En tal sentido se tomaron los valores del índice ONI reportados por la NOAA (ver anexo 11.4) para cada mes de cada año en el período 1950-2016, los cuales se promediaron, obteniéndose un promedio anual del índice ONI para cada año del período analizado.

Posteriormente se calculó para cada año de análisis, la diferencia media cuadrática de cada mes con respecto a la media anual, de forma tal de establecer si el índice ONI de algún mes en particular mostraba algún tipo de correlación con el promedio anual. Ese mes correspondería a aquél en el cual la suma de todas las diferencias cuadráticas con respecto al promedio de cada año en el lapso 1950-2016 fuese mínima, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Suma de diferencias cuadráticas} = \sum_{i=1950}^{2016} \sum_{j=1}^{12} (\text{Índice ONI}_j - \text{Índice ONI promedio anual}_i)^2 \quad (5.1)$$

donde:

i= Año analizado.

j= Mes del año i que se está analizando.

De las diferentes sumas cuadráticas calculadas, la menor fue la correspondiente al mes de Junio, lo que significa que el índice ONI correspondiente al mes de Junio de cada año es el que más se asemeja al correspondiente índice ONI promedio anual del cada año.

En la Figura 5-1 se presenta la relación existente entre el índice ONI del mes de Junio y el índice ONI promedio anual.

Por otra parte, si el análisis se realiza entre el índice ONI promedio anual y el índice ONI resultante de promediar los índices ONI individuales de los meses de Mayo, Junio y Julio de cada año, de acuerdo con la ecuación general 5.2, se obtiene una correlación aún mejor, tal como puede apreciarse en la Figura 5-2.

$$\text{Suma de dif. cuad.} = \sum_{i=1950}^{2016} \sum_{j=6}^6 (\text{Promedio Índice ONI}_{j-1,j,j+1} - \text{Índice ONI promedio anual}_i)^2 \quad (5.2)$$

Esta metodología no solamente permite disponer de herramientas matemáticas de predicción a corto plazo de los valores y tendencias del índice ONI, sino que también permitirán una evaluación más expedita a la hora de clasificar un determinado año como más caliente, más frío, o normal, de acuerdo a los valores del mencionado índice y a su posterior relación con años donde, de acuerdo con la literatura, han ocurrido eventos “El Niño” o “La Niña”.

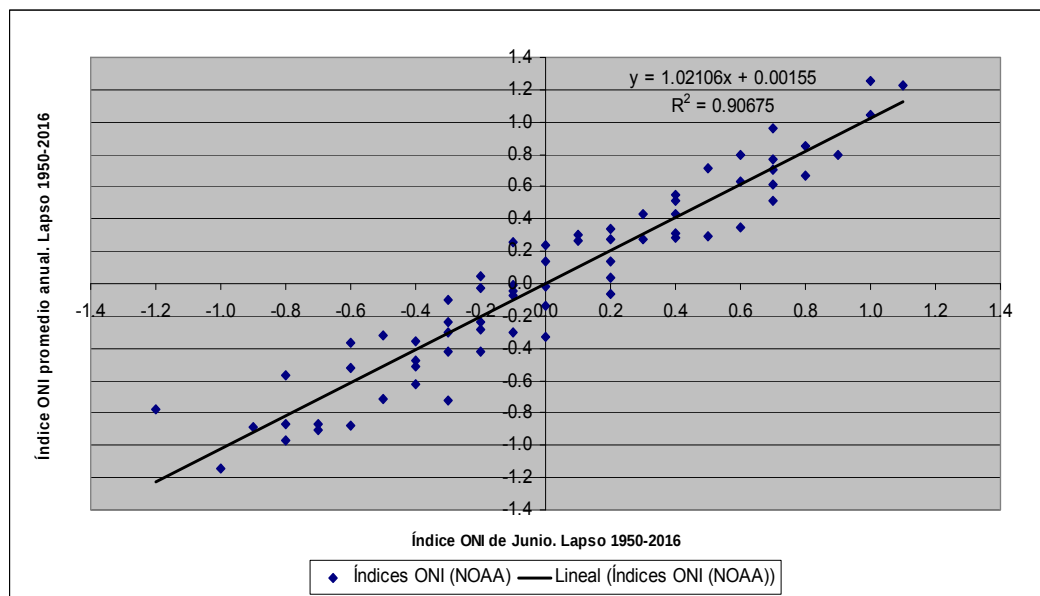


Figura 5-1. Correlación matemática entre el índice ONI del mes de Junio y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2016.

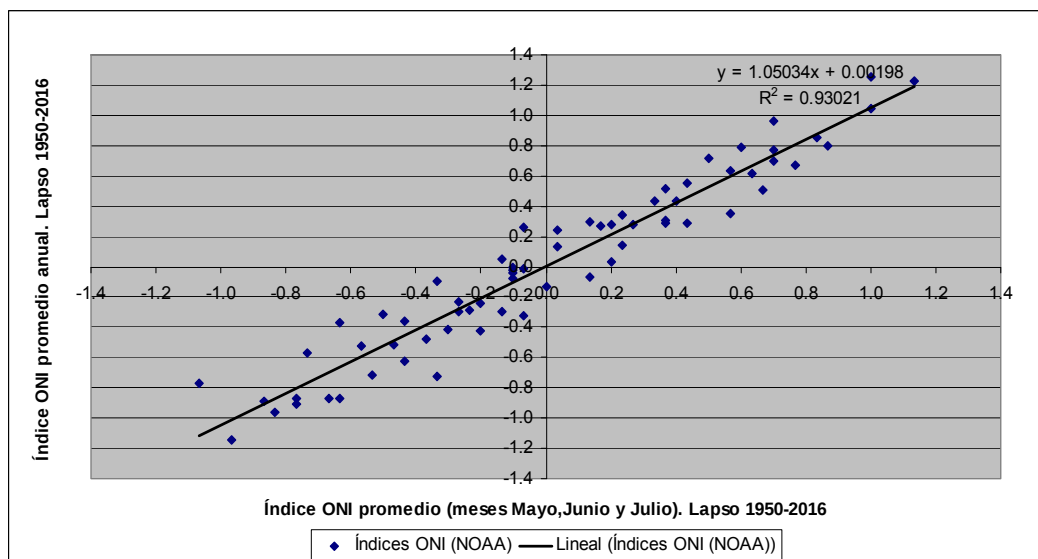


Figura 5-2. Correlación matemática entre el índice ONI promedio de los meses de Mayo, Junio y Julio, y el índice ONI promedio anual. Lapso 1950-2016.

Adicionalmente se pueden encontrar otras correlaciones similares a las anteriores pero haciendo un tratamiento distinto de los datos del índice ONI.

En vez de analizar un año calendario en específico (Enero-Diciembre) se puede realizar un análisis tomando como el lapso de tiempo el comprendido entre Julio de un año y Junio del siguiente año.

A dicho lapso de tiempo se le calcula el promedio de los respectivos índices ONI mensuales y el valor obtenido es entonces correlacionado con el índice ONI de un mes en particular que esté incluido dentro del lapso de doce (12) meses que se esté evaluando.

Este análisis se hizo para cada uno de los meses (12), encontrándose que la mejor correlación era la que relacionaba al índice ONI promedio de los doce (12) meses, con el índice ONI del mes de Enero.

Los resultados de dicha correlación se muestran en la Figura 5-3 y en la Figura 5-4, y los mismos tienen una importancia significativa, ya que permite predecir con muy buena precisión a partir del índice ONI del mes de Enero de un año determinado, como será el comportamiento futuro de dicho año en relación a si será un año “El Niño” o “La Niña” y con que intensidad en cada caso.

Si esto a su vez se relaciona con el hecho de que en los años “El Niño” el número de fenómenos meteorológicos que presenta la temporada de huracanes en el Atlántico es significativamente menor a la presente en un año “La Niña”, (ver Tabla 5-3) la relación encontrada permitirá tener un panorama bastante claro de cómo serán las características de la venidera temporada de huracanes en el Atlántico.

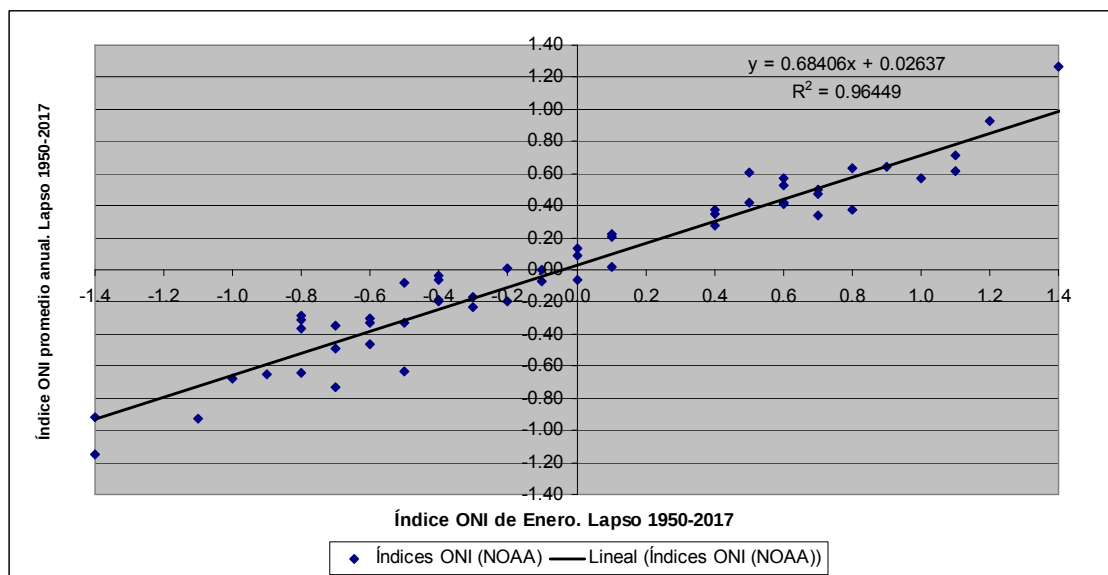


Figura 5-3. Correlación matemática entre el índice ONI del mes de Enero y el índice ONI promedio anual tomando como año el período Julio del presente año a Junio del siguiente año. Lapso 1950-2017.

Teniendo definido entonces con bastante precisión como será la temporada de huracanes (año Niño o Niña), se puede relacionar dicha información con mapas de probabilidades de ocurrencia de que se presenten fenómenos como depresiones o tormentas tropicales o

huracanes grado 1 al 5, que se generen en un dominio de estudio específico, tanto para años “El Niño” como para años “La Niña” y para condiciones neutras, siendo la generación de estos mapas generales del comportamiento de los huracanes, parte importante del presente trabajo.

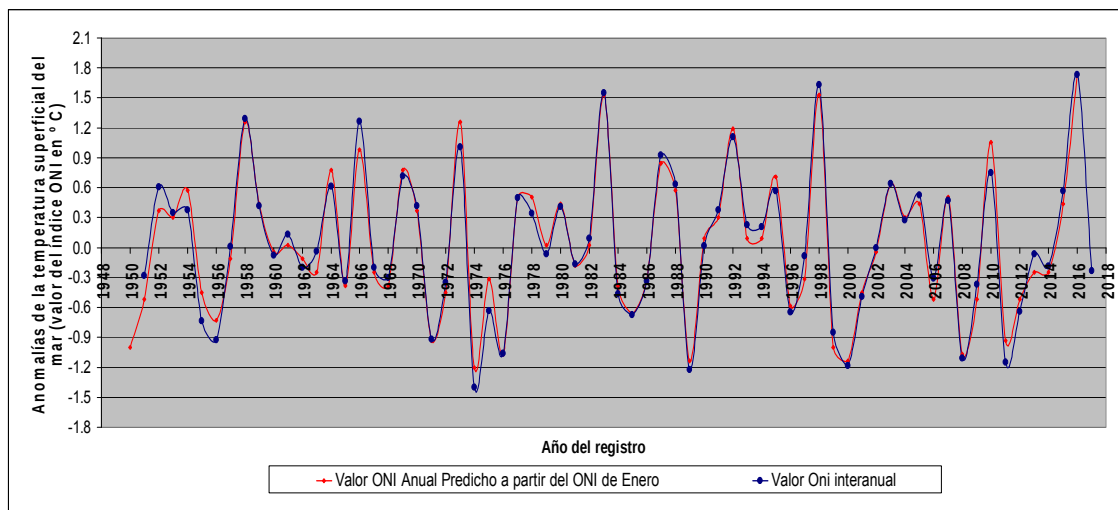


Figura 5-4. Comparación de los valores del índice ONI calculados a partir de las mediciones de la NOAA y los predichos con la ecuación desarrollada.

Tabla 5-3. Relación entre el promedio anual del índice ONI y algunas características relevantes de las temporadas de huracanes en el Atlántico.

Caracterización de la temporada de huracanes en términos del valor del índice ONI (Julio a Junio del siguiente año)	Rangos promedio de la anomalía de temperatura del agua asociada al índice ONI (Julio a Junio del siguiente año)	Promedio anual del número de eventos (Julio a Junio del siguiente año)	Promedio anual de los días de ocurrencia de eventos (Julio a Junio del siguiente año)	Promedio del índice ECA (calculado entre Julio y Junio del siguiente año)
Niño muy fuerte	Superior a +1.35	9.0	45.3	44.6
Niño fuerte	Entre +1.01 y +1.35	8.7	52.8	73.1
Niño moderado	Entre +0.76 y +1.00	14.0	62.8	33.7
Niño débil	Entre +0.41 y +0.75	14.3	91.6	98.1
Condición neutra	Entre +0.40 y -0.40	14.7	97.6	120.0
Niña débil	Entre -0.41 y -0.75	17.8	118.6	133.4
Niña moderada	Entre -0.76 y -1.00	18.4	108.2	116.9
Niña fuerte	Entre -1.01 y -1.35	18.0	108.3	136.3

A partir de la tabla anterior se puede concluir que tanto el número de eventos como la duración total de días en los que estos se presentan, que ocurren en el lapso de un (01) año “Niño fuerte” o “Niño muy fuerte” es menos de la mitad de los que se presentan cuando el año tiene las características de “Niña Moderada” o “Niña fuerte”, lo que desde el punto de vista de la “amenaza” que representan los huracanes es un hecho bien significativo, dado que se traduce en que en años “Niño” las temporadas de huracanes en el Atlántico serán mucho menos intensas que las que se presentarían en el caso de que el año tuviera características asociadas con el fenómeno de “La Niña”, y por ende también lo será el riesgo asociado al paso de dichos fenómenos por una determinada área.

Otra conclusión relevante es que en años “Niño muy fuerte” el número promedio de días de la temporada de huracanes (180 días en total) en los cuales hay probabilidad de que ocurra un fenómeno meteorológico de cualquier categoría es de 45 (25% del total) mientras que en años “Niña fuerte” es del orden de 110 días (61% del total).

6. GENERACIÓN DE MAPAS DE DIFERENTES VARIABLES RELACIONADAS CON EL ACCIONAR Y COMPORTAMIENTO DE CICLONES TROPICALES EN EL MAR CARIBE.

En general, cualquier pronóstico meteorológico en tiempo real (incluyéndose todo lo relacionado con la trayectoria e intensidad de fenómenos meteorológicos como huracanes), debe considerar como una de sus componentes fundamentales la climatología del fenómeno que pretende pronosticar, pudiéndose afirmar que la función de dichos pronósticos es predecir la desviación de las condiciones diarias con respecto a esa climatología o “estado normal” de las mismas.

Por ello, el conocer y difundir de manera amplia todo lo concerniente a la climatología asociada a la acción de los huracanes sobre las costas venezolanas y el mar Caribe, debería servir no solamente como información cualitativa fundamental, sino también como insumo básico para la toma de decisiones en tiempo real.

Para contribuir a lograr lo expresado en los párrafos precedentes, se elaboraron “mapas” asociados al paso y características de fenómenos meteorológicos (depresiones y tormentas tropicales y huracanes) que persiguen, a partir del conocimiento técnico-científico sobre su tránsito por determinadas regiones, plasmar en láminas de sencilla interpretación la distribución geográfica que presentan diversos parámetros asociados con el paso y accionar de dichos fenómenos, tanto en el mar Caribe como en las vecindades de las costas venezolanas que forman parte de éste.

Para su elaboración se han procesado estadísticamente cada una de las trayectorias e intensidades de los fenómenos meteorológicos incluidos en la base de datos HURDAT de la NOAA (ver Figura 6-1), las cuales luego fueron procesadas y graficadas utilizando un sistema de información geográfica (ARGIS).

Cada “mapa” está acompañado de las explicaciones e interpretaciones necesarias para maximizar su uso.

6.1 SELECCIÓN DEL DOMINIO DE ESTUDIO Y LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL UTILIZADA PARA SU ANÁLISIS.

El área sobre el cual se realizaron todos los estudios, cubrió el mar Caribe y parte del océano Atlántico, así como parte de las áreas terrestres, en especial zonas costeras de buena parte de los países que se sitúan en el área (ver Figura 6-2), cubriendo un espacio que varía aproximadamente entre los 45° y 105° de longitud oeste y entre 7° y 35° de latitud norte.

En el caso particular de la República Bolivariana de Venezuela, cubrió el litoral costero del norte del país, así como a la isla de Aves (ubicada a casi 600 km. al norte de las costas venezolanas), sobre la cual se hizo un estudio específico asociado a la “marea de tormenta” que se genera por el accionar de los huracanes que inciden y afectan a esta pequeña pero importantísima área terrestre del territorio venezolano.

Para efectos de cálculo, el dominio de estudio fue discretizado en elementos cuadrados que cubrían 0,5° tanto de latitud como de longitud, que a efectos prácticos conforman celdas cuadradas 55 km. de lado (esto estrictamente es variable dependiendo de la latitud a la cual se ubique el elemento analizado), cubriéndose con cada elemento de análisis, unos 3025 km².

La base de datos utilizada abarca el lapso de tiempo comprendido entre 1851-2016, lapso para el cual se dispone de las trayectorias de cada uno de los fenómenos meteorológicos que se han generado y han transitado a lo largo del área de estudio, disponiéndose también aunque para lapsos de tiempo menores, de otras variables de interés tales como la velocidad de desplazamiento del huracán, la presión mínima central y la velocidad de vientos máximos sostenidos.

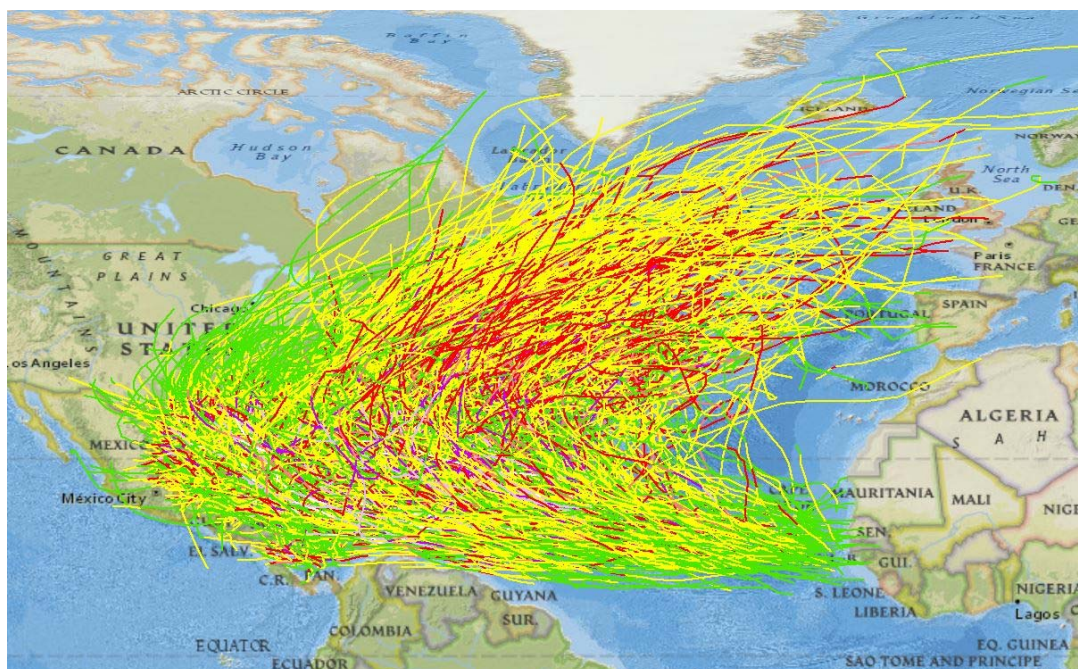


Figura 6-1. Trayectorias de todos los ciclones tropicales documentados para el Atlántico Norte (1851-2016).

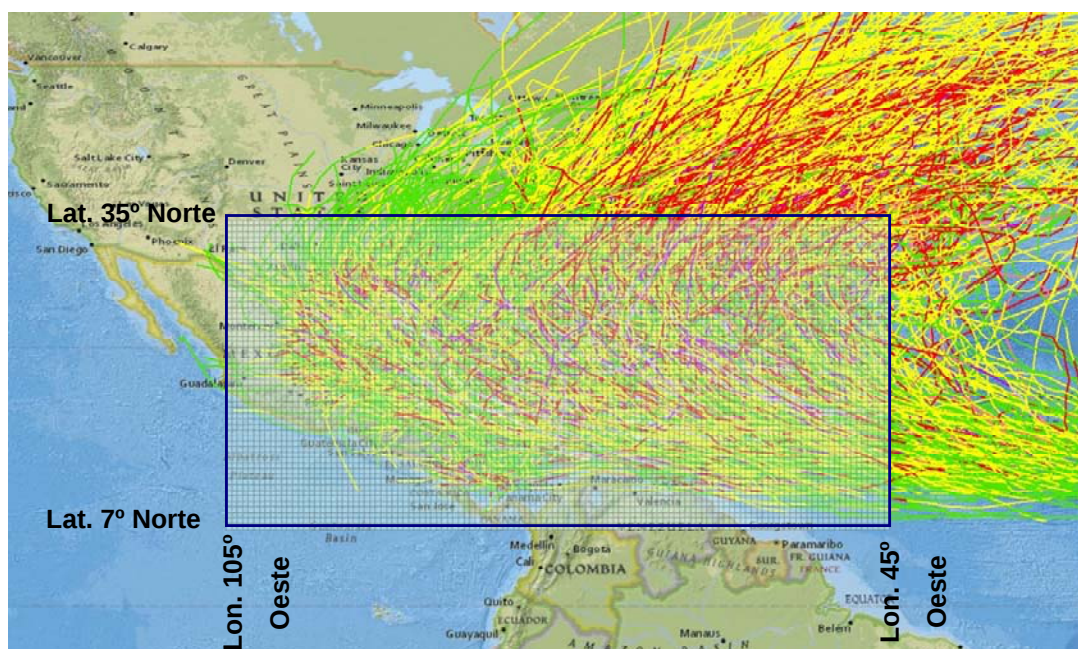


Figura 6-2. Ubicación relativa del dominio de estudio con respecto al espacio total por el que han transitado los fenómenos meteorológicos en el océano Atlántico.

6.2 GENERACIÓN DE MAPAS CARACTERIZADORES DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA CUENCA ATLÁNTICA

Los diferentes mapas desarrollados se presentan en el anexo 11.5. En una parte de ellos se consideran situaciones generales, mientras que en otros se presentan las condiciones reinantes bajo la acción específica de fenómenos con intensidades diferentes (depresiones y tormentas tropicales) así como los huracanes grado 1 al 5.

A continuación se enumeran cada una de las situaciones modeladas y analizadas, así como el espacio temporal de datos que fue tomado en consideración para generar cada mapa:

- Mapa de distribución del número total de fenómenos meteorológicos que han ocurrido en el lapso 1851-2016, sin hacer distinción en la categoría de cada uno de dichos fenómenos, generándose “isoáreas” de ocurrencia que permiten identificar rápidamente cuantos fenómenos han pasado por una determinada zona (Figura 11-5).

- Mapa de frecuencia relativa del número total de fenómenos meteorológicos que han ocurrido en el lapso 1851-2016, sin hacer distinción en la categoría de cada uno de dichos fenómenos. Esta frecuencia relativa que representa una fracción del máximo que se presenta en una de las celdas de cálculo definidas para estudiar el dominio que se seleccionó (Figura 11-6). El centro de la celda por la cual transitó mayor número de fenómenos tiene coordenadas (Lat. 33,75° N : Long. 75,75° O) y en la misma se contabilizaron 55 eventos de diferente intensidad.

- Mapa que muestra la distribución espacial de las presiones mínimas asociadas al paso de ciclones tropicales en la cuenca Atlántica en el lapso 1951-2016 por cada uno de los “nodos de cálculo” presentándose las correspondientes áreas de igual presión (Figura 11-7).

- Mapa de las velocidades máximas de traslación de cada uno de los fenómenos meteorológicos que han ocurrido en el lapso 1851-2016, sin hacer distinción en la categoría de cada uno de dichos fenómenos (Figura 11-8).

- Mapas de la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos para cada uno de sus diferentes grados de intensidad, es decir: depresión tropical, tormenta tropical y huracanes grado 1, grado 2, grado 3, grado 4 y grado 5 (Figura 11-9 a Figura 11-15), que han ocurrido en la cuenca atlántica en el lapso 1851-2016 desarrollados de acuerdo con la metodología descrita en el aparte 7.1 y el anexo 11.5.

- Mapas de la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos meteorológicos para cada uno de sus diferentes grados de intensidad, es decir: depresión tropical, tormenta tropical y huracanes grado 1, grado 2, grado 3, grado 4 y grado 5, que han ocurrido en la cuenca atlántica en el lapso 1950-2016 desarrollados de acuerdo con la metodología descrita en el aparte 7.1 y presentados en el anexo 11.5, pero separando el análisis en años “Niño”, años “Niña” y condiciones neutrales (Figura 11-16 a Figura 11-34).

Estos mapas se desarrollaron incluyendo la data histórica disponible, independientemente de que la calidad y precisión de la misma ha variado considerablemente a medida que la tecnología utilizada para hacer las mediciones ha ido evolucionando y mejorando con el tiempo, e

independientemente de la condición (Niño, Niña o Neutral) que haya presentado la temporada de huracanes.

Del dominio general de cálculo que sirvió para generar estos mapas, y con la finalidad de cumplir con otro de los objetivos planteados, se tomó el específicamente el sector donde se ubica la “Isla de Aves”, y sobre el mismo se hizo un estudio particular del peligro y riesgo asociado a la amenaza representada por la sobre-elevación del nivel medio del mar debido al paso de huracanes por el sector.

6.2.1 Selección del método de interpolación utilizado para el cálculo espacial de las variables de estudio.

Estudios en diversas partes del mundo han propuesto un sinnúmero de metodologías de interpolación buscando identificar aquella que se ajuste mejor a las condiciones climáticas de una región. Tradicionalmente se han utilizado métodos lineales y cuadráticos a partir de los cuales se generan valores interpolados. En la actualidad, el uso de herramientas más complejas de SIG (Sistemas de Información Geográfica) y geoestadística, incorporan metodologías que explican mejor los eventos y/o condiciones que se quieren representar.

Una vez seleccionadas las variables cuya variabilidad espacial se va a representar a través de “mapas”, se hace necesario escoger un método de interpolación que permita a partir de la información puntual que se tiene (puntos muestrales con valores reales), generar información continua a lo largo del dominio de estudio (puntos no muestrales con valores estimados), los cuales conforman la superficie de interpolación.

Detrás de cada técnica de interpolación está implícita la primera ley geográfica de Tobler (1979), según la cual “todo está relacionado con todo, pero las cosas más cercanas están más relacionadas entre sí que las más lejanas”.

Si bien el objetivo del presente trabajo no es hacer un exhaustivo estudio para determinar a partir de la distribución espacial de la data que se tiene, cual es el método de interpolación más exacto, si se investigó en la literatura cuales eran los métodos de mayor uso así como las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, luego de lo cual se hizo la selección definitiva del método de interpolación que se utilizó en este trabajo para generar los mapas mencionados en el aparte anterior.

Las técnicas de interpolación que se evaluaron para generar las superficies de interpolación, a partir de las cuales se obtuvieron los valores de la variable estudiada en los puntos no muestrales se pueden dividir en técnicas determinísticas y técnicas geoestadísticas.

1) Métodos determinísticos: Son los que formulan suposiciones generales acerca del carácter de la superficie a interpolar, y en función de ellas establecen la función matemática de interpolación (métodos directos). De estos métodos se analizaron el:

- IDW (Inverse Distance Weighting) o método de la distancia inversa ponderada.

- GPI (Global Polinomial Interpolation) o método global de interpolación.

2) Métodos geoestadísticos: Son los que estudian el carácter de la autocorrelación espacial de la variable a ser interpolada, para lo cual utilizan los puntos muestrales. De estos métodos se analizaron el:

- Kriging Universal: usado normalmente cuando los datos presentan tendencia.

- Kriging Ordinario: utilizado normalmente cuando los datos no presentan tendencia.

De los métodos evaluados se optó por seleccionar el método IDW que utiliza técnicas de interpolación deterministas, donde las predicciones espaciales se realizan a través de fórmulas matemáticas que dan mayor peso a los valores cercanos conocidos (valores reales), a la vez que generan superficies donde el valor de la superficie de predicción es exactamente igual al valor observado para todas las localizaciones muestrales.

6.2.2 *Análisis de los mapas generados.*

A partir de los diferentes mapas generados y presentados en el anexo 11.5 se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

- En la cuenca Atlántica comprendida dentro del dominio de estudio, la zona marítima por la cual han pasado el mayor número de fenómenos meteorológicos es la comprendida entre los 29° y 35° (grados) de latitud norte y entre 75° y 80° (grados) de longitud oeste, teniéndose que para cada celda en la que fue discretizado el dominio de estudio (celdas de 0,5° x 0,5°) el máximo número de eventos contabilizado en alguna de ellas fue de 55 eventos, teniéndose en el caso específico de las costas venezolanas (tanto continentales como insulares), que el área donde se ubica isla de Aves es la zona que más frecuentemente se ve afectada, mientras que las áreas costeras de las costas continentales son muy poco afectadas por este tipo de fenómenos.

- A partir del mapa donde se representan las presiones mínimas se pudo inferir cuales son las áreas por las cuales han pasado los fenómenos de mayor intensidad (a mayor intensidad menor es la presión en el centro del huracán), y por tanto las áreas de mayor peligrosidad y riesgo en lo que se refiere a la acción de los huracanes, destacándose claramente en este sentido tres (3) áreas: el canal de Yucatán que separa a la península de Yucatán de la isla de Cuba, el sector central del golfo de México y el sur de la península de La Florida, a través de las cuales se han desplazado los más potentes huracanes grado 4 y grado 5 con presiones mínimas que oscilaron entre 882 y 900 mb.

- El mapa donde se representan las velocidades medias de traslación permitió conocer que en el caso específico de las zonas costeras de Venezuela, cuyo límite superior es el Cabo San Román en la península de Paraguaná, las velocidades de traslación de los fenómenos que afectan dichas áreas son del orden de 40 km/h, lo cual permitiría en los casos en que se requiriese que cualquier autoridad de protección civil, estime los tiempos de llegada del fenómeno a las costas y en consecuencia, pueda

establecer rangos temporales de alertamiento y/o evacuación de la población que potencialmente pudiese ser afectada. Estas velocidades promedio son muy similares a las registradas en la mayor parte de la cuenca Atlántica, excepto en sectores muy puntuales ubicados al oeste de isla de Aves y al sur del canal de La Mona (que separa a Puerto Rico de República Dominicana), y al norte de la isla de Cuba, en los cuales las velocidades promedio están en el orden de 60 a 80 km/h.

- Los mapas generales de probabilidad anual de ocurrencia permiten identificar con claridad la probabilidad de que un evento o fenómeno de determinada intensidad pueda ocurrir en una determinada localización, pero dado que en la generación de las isoáreas de probabilidad que se presentan en dichos planos se han usado métodos de interpolación, y que por tanto su forma general es función del método de interpolación utilizado, se recomienda que si se necesita conocer con mayor precisión las probabilidades, peligro y período de retorno asociados al paso de un determinado evento por un área específica, se haga el análisis particular de la misma a través de la metodología descrita en el aparte 7 y en el anexo 11.6, la cual no está en modo alguna influenciada por métodos de interpolación.

Los mapas generados a partir de la totalidad de los datos disponibles entre 1851 y 2016 permiten definir claramente tres (3) áreas donde la intensidad de la acción de los huracanes y la probabilidad de ocurrencia de éstos, es sobresaliente.

Estas tres (3) áreas son: el estrecho de Yucatán que se ubica entre la península de Yucatán y la parte más occidental de la isla de Cuba, el sector central del golfo de México entre las latitudes 25 y 28° norte y las longitudes 85° oeste, y un tercer sector entre los 30 y 35° de latitud norte y 75 y 80° de longitud oeste que abarca el sector costero de los estados de Georgia, Carolina del Sur y Carolina del Norte, todos pertenecientes a los Estados Unidos de América.

En estas áreas, la probabilidad anual de que se presente una depresión tropical es del orden del 25 al 35%, de que se presente un huracán grado 1 es del orden de 10 a 15%, de que se presente un huracán grado 3 es del orden de 4 a 8% y de que se presente un huracán grado 5 es del orden de 1 a 2% para las dos (2) primeras áreas mencionadas (ver Figura 11-9 a Figura 11-15 en el anexo 11.5).

- A partir de los mapas generados para condiciones de años “Neutral”, “Niño” o “Niña” con la información correspondiente al lapso 1950-2016 (que es el lapso de tiempo en el cual se dispone de los índices ONI de la NOAA a partir de los cuales se puede hacer una caracterización precisa de la condición de “año neutro, niño o niña”) se puede afirmar que al comparar mapas de la misma intensidad para las tres (3) condiciones, por ejemplo el mapa donde se muestra la probabilidad de excedencia de que el fenómeno sea igual o más intenso que una depresión tropical, es notorio que la probabilidad de ocurrencia es recurrentemente mayor para la condición de “año niña”, teniéndose áreas que para esta condición presentan una probabilidad de ocurrencia de entre un 17,5 y un 20%, mientras que bajo condición de “año niño” los sectores con mayor probabilidad de ocurrencia presentan en todos los casos porcentajes de inferiores a 17,5%, que además ocurren en áreas de menor extensión que cuando las condiciones son de “año niña”.

7. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL PELIGRO Y RIESGO ASOCIADO AL TRÁNSITO DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EN UN DOMINIO DE CÁLCULO ESPECÍFICO.

7.1 REGISTRO DE LOS CICLONES TROPICALES.

Los ciclones tropicales se caracterizan por presentar una circulación cerrada de sus vientos, pudiendo dividirse y caracterizarse en base a su viento máximo sostenido en superficie (VMS) según la categorización propuesta en la escala de Saffir-Simpson (ver detalles en el anexo 11.1).

Los registros de ocurrencia de los diferentes fenómenos naturales que se han presentado en el océano Atlántico y el mar Caribe fueron obtenidos de la base de datos HURDAT, tal y como se mencionó en el aparte 5, analizándose las características de cada una de sus trayectorias dentro del dominio de estudio definido en el aparte 6.1.

En cada elemento o “nodo de cálculo” consistente en un área cuadrada de $0,5^\circ$ (aproximadamente 55 km. a nivel del ecuador), se procedió a contabilizar el número de trayectorias que pasaron dentro de cada “nodo de cálculo” como el mostrado en la Figura 7-1.

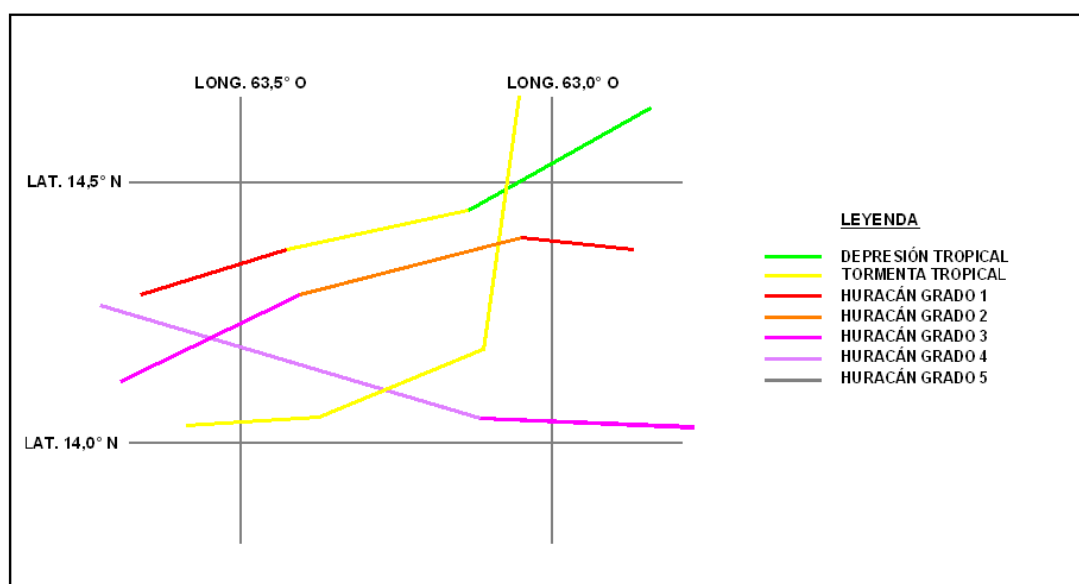


Figura 7-1. . Elemento o “nodo de cálculo” típico utilizado para discretizar el dominio de estudio.

Fuente: elaboración propia.

En caso de que dentro del “nodo o área de cálculo”, la trayectoria del fenómeno natural estudiado presentase diferentes intensidades tal y como se ejemplifica en la Figura 7-1, a efectos de cualquier cálculo se tomó la mayor de las intensidades, contabilizándose además como un solo evento.

En el anexo 11.6 se presenta en forma detallada la metodología seguida en cada “nodo de cálculo” mediante el desarrollo de un ejemplo hipotético, en el cual se calcularon la tasa de excedencia, el período de retorno y el peligro asociado al paso de los diferentes fenómenos estudiados a través del dominio de estudio.

7.2 CÁLCULO DE LA TASA DE EXCEDENCIA, FUNCIÓN DE PELIGRO Y PERÍODO DE RETORNO ASOCIADO AL PASO DE CICLONES TROPICALES EN LAS CERCANÍAS DE ISLA DE AVES.

De acuerdo con la metodología descrita en el anexo 11.6, en la Tabla 7-1 se presentan los resultados obtenidos para la “celda de cálculo” dentro de la cual se ubica la isla de Aves, habiéndose incluido en el análisis todos aquellos fenómenos meteorológicos cuya trayectoria hubiese pasado a menos de 65 millas náuticas (unos 120 km) de la posición de la isla en el lapso comprendido entre 1851 y 2017.

Tabla 7-1. Caracterización y contabilización de los distintos fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves (Lapso: 1851-2017).

Intensidad (i)	Categoría	M _i (eventos de intensidad i)
1	DT	7
2	TT	38
3	H1	9
4	H2	9
5	H3	5
6	H4	2
7	H5	2
Total		72

Por otra parte, la tasa anualizada de excedencia, la función de peligro $P(i)$, entendiendo el peligro como la probabilidad anual de que se presente un evento que exceda la intensidad i sin avanzar al siguiente nivel y el período de retorno (promedio temporal en que vuelve a ocurrir la excedencia de cierta intensidad i) se muestran en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Tasa de excedencia, función de peligro y período de retorno asociados al paso de ciclones en áreas cercanas a isla de Aves.

Intensidad (i)	Categoría	M _i (Eventos de intensidad i)	Tasa de excedencia $v(i)$	Tasa de excedencia anualizada	Peligro $P(i)$	Período de retorno (Tr) (años)
1	DT	7	72	0.431	0.097	2.32
2	TT	38	65	0.389	0.528	2.57
3	H1	9	27	0.162	0.125	6.19
4	H2	9	18	0.108	0.125	9.28
5	H3	5	9	0.054	0.069	18.56
6	H4	2	4	0.024	0.028	41.75
7	H5	2	2	0.012	0.028	83.50
Total		72				

A partir de la tabla anterior se puede concluir que en promedio, cada 2,5 años la isla es afectada en mayor o menor grado por un fenómeno meteorológico cuya intensidad es como mínimo el de una tormenta tropical, mientras que en promedio cada 19 y 84 años es afectada por un fenómeno meteorológico cuya intensidad es como mínimo el de un huracán grado 3 (H3) o un huracán grado 5 (H5), respectivamente.

Aunque muy pocos de estos fenómenos meteorológicos pasaron directamente sobre isla de Aves, todos en mayor o menor grado, dependiendo de cuán cerca pasaron y de cual era su intensidad en la escala de Saffir-Simpson para ese momento, generaron sobre-elevación del nivel de mar sobre la morfología de la isla, impactando su frágil y llano relieve, a la vez que dejaban sumergida buena

parte del área terrestre de la misma, con los consecuentes efectos asociados a la pérdida de parte del material arenoso que conforma la isla, pudiendo en casos en que el impacto de estos fenómenos se repitiera con cierta frecuencia, disminuir la capacidad de recuperación natural de la morfología original de la isla, producto del arrastre de sedimentos por parte de oleaje y del viento.

En el siguiente aparte se describen y detallan cada una de las componentes asociadas al aumento puntual del nivel del mar por efecto del paso de fenómenos meteorológicos, a la vez que se calculan mediante las metodologías descritas los valores de sobre-elevación asociados al paso de cada uno de los fenómenos mostrados en la Tabla 7-2 donde se tenga información del valor de la presión central del mismo, para a partir de los resultados obtenidos, evaluar y modelar la acción de los casos más críticos.

8. **CÁLCULO GENERAL DE LAS DIFERENTES COMPONENTES ASOCIADAS A LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL MAR.**

Dentro de la ingeniería de costas, el estudio de la cota de inundación es de suma importancia, no sólo por ser un aspecto más que caracteriza a una determinada zona litoral, sino también desde el punto de vista urbanístico, ya que permite establecer límites en la ordenación territorial y en el planeamiento y progresión del crecimiento urbano y humano.

En otras palabras, el cálculo de la variación del nivel del mar es un paso inevitable para poder estimar la cota de inundación de cualquier punto de la costa.

Como parte de este trabajo, se hará el cálculo de la sobre-elevación del mar para una localidad específica: isla de Aves, no solamente porque su importancia geopolítica para Venezuela es muy alta, sino porque es la porción de tierra perteneciente a Venezuela que está por mucho, más sometida a la acción de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes y tormentas tropicales, cuya acción y contribución es una componente importante dentro del aumento de la sobre-elevación del mar por encima de su nivel normal (nivel medio del mar).

La sobre-elevación del nivel de mar puede expresarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\eta_{total} = \eta_{astronómica} + \eta_{meteorológica} + \eta_{oleaje} + \eta_{fluvial} + \quad (8.1)$$

en cuyo cálculo normalmente se asume una superposición lineal de las distintas contribuciones, aunque esto no sea totalmente cierto desde el punto de vista matemático, ya que con frecuencia existen interacciones no lineales de la marea meteorológica con la marea astronómica, con descargas fluviales, etc.

A continuación se describirán cada una de las componentes que integran la ecuación (8.1) y se expondrá la metodología general de cálculo utilizada para la determinación de cada componente, para luego aplicar específicamente esa metodología al sector donde se ubica “Isla de Aves” bajo situaciones críticas asociadas al paso de fenómenos meteorológicos extremos, lo que redundará en mayores sobre-elevaciones del nivel medio del mar, con el consecuente peligro y riesgo asociado a la “amenaza” estudiada (sobre-elevación del nivel del mar asociada al paso de huracanes por un determinado sector).

Para el caso estudiado en este trabajo se conoce la marea astronómica a través de predicciones de marea disponibles en sitios cercanos, la marea meteorológica será calculada para diferentes condiciones, mientras que la contribución fluvial es nula dado que no hay ningún río que aporte caudal a las áreas estudiadas, por lo que la sobre-elevación total del nivel de mar se calculará tomando en cuenta la contribución de las componentes astronómicas, meteorológicas y de oleaje.

Los cálculos obtenidos permitirán evaluar y caracterizar la respuesta de la isla ante esos eventos extremos, permitiendo entre otros aspectos, establecer que porciones de la isla quedan bajo el agua y que porciones no quedan sumergidas.

8.1 COMPONENTE ASTRONÓMICA DEL NIVEL DEL MAR (MAREA).

En términos muy sencillos, la marea es la variación periódica del nivel de un cuerpo de agua que asciende y desciende en respuesta a las interacciones gravitacionales entre el Sol, la Tierra y la Luna.

Es la componente que puede predecirse con mayor exactitud debido a que su origen está ligado al movimiento y acción de los astros sobre la Tierra, esencialmente el Sol y la Luna, y al ser el movimiento de estos astros totalmente predecibles también lo es su influencia sobre las masas de agua (océanos de la Tierra).

Una de las formulaciones matemáticas a través de la cual se representa la variación espacial y temporal de los niveles de marea y de las velocidades de corriente es el llamado “Análisis Armónico”, el cual se basa en la hipótesis de que las variaciones del nivel del mar pueden ser descritas en función de un número finito de contribuciones armónicas de la forma:

$$A_{i,j} \cos(w_i t - g_{i,j}) \quad (8.2)$$

Donde $A_{i,j}$ es la amplitud de cada componente (i) en el punto geográfico considerado (j), $g_{i,j}$ es el desfase con respecto al máximo de la marea de equilibrio en Greenwich, y w_i es la frecuencia angular del armónico. Estas frecuencias no tienen valores aleatorios, por el contrario, dichos valores son determinados por los ciclos de las fuerzas astronómicas que dan origen a las mareas.

Un análisis completo de los datos de un mareógrafo tomados durante un año puede incluir unos cien (100) constituyentes, pudiendo luego de realizarse ese estudio, definirse la elevación de la superficie η en un punto j y en un determinado instante de tiempo t de acuerdo a la expresión:

$$\eta_{i,j} = \sum_{i=1}^n A_{i,j} f_{i,t} \cos(w_i t - g_{i,j} + (V_{i,t} + \nu_{i,t})) \quad (8.3)$$

en la cual $A_{i,j}$ es la amplitud del armónico i en el punto j , w_i es la frecuencia, $g_{i,j}$ es el desfase con respecto al máximo de la marea de equilibrio en Greenwich (nótese que esta variable no tiene dependencia temporal por lo cual sirve para expresar las diferencias de fase existentes entre puntos geográficos en un determinado instante), $V_{i,t}$ es el desfase con respecto al origen de tiempo (con valores entre 0 y 2π a lo largo de un período de marea) y por último, los denominados factores nodales $f_{i,t}$ y $\nu_{i,t}$ los cuales son modulaciones, tanto de amplitud como de fase, que se utilizan para incluir los efectos de los armónicos de período largo (hasta 18,6 años), cuya influencia no puede incluirse en el análisis de un año de datos. Un exhaustivo y completo análisis de este método se puede encontrar en Foreman (1977).

A los efectos de este trabajo, se utilizó la predicción de niveles generada por un software comercial especializado, usándose la estación con datos disponibles que estuviera más cerca del área de estudio (isla de Aves), ubicada en la isla de Dominica, a unos 230 km al este de isla de Aves, específicamente en el sector oeste de Dominica conocido como “Portsmouth”.

En la Figura 8-1 se muestra la ubicación relativa entre ambas localizaciones, mientras que en el anexo 11.7, se presenta un resumen de las características de la marea obtenidas en Portsmouth, y que serán tomadas como datos para hacer los cálculos de sobre-elevación en isla de Aves.



Figura 8-1. Ubicación relativa entre la estación donde se dispone de predicciones de marea e isla de Aves.

Fuente: Google Earth y modificada por el autor.

8.2 COMPONENTE METEOROLÓGICA Ó MAREA DE TORMENTA (“STORM SURGE”), ESTADO DEL ARTE.

Para acometer el estudio de la marea de tormenta asociada a la acción de ciclones tropicales se han desarrollado diferentes metodologías.

En primer término los modelos empíricos de tormenta son relativamente fáciles de desarrollar y de aplicar, ya que se derivan a partir del análisis histórico de datos de campo.

En general, este tipo de modelos utilizan funciones empíricas para relacionar la altura pico de la marejada con la disminución de presión de la tormenta, calculado como la diferencia de presión entre el centro de tormenta y su periferia. Tienden a calcular sólo picos de marea en líneas de costa abierta.

Conner et al. (1957) desarrollaron una ecuación empírica obtenida a partir de una regresión lineal para calcular las alturas pico de los huracanes en tierra, utilizando datos históricos de huracanes observados y alturas de oleaje a lo largo de las costas abiertas.

Harris (1959,1963) encontró variaciones sistemáticas de la marejada asociadas a dos (2) parámetros: la presión central mínima del fenómeno y una distancia de 50 fathoms (brazas, ó 91,44 m) a partir de la línea de costa, concluyendo que la

pendiente de la plataforma continental sólo tiene una incidencia menor sobre la marea de tormenta.

Jelesnianski (1972) partiendo de datos empíricos y cálculos teóricos, desarrolló tres (3) nomogramas cuyo uso permite una estimación rápida del pico de la marejada. El primer nomograma utiliza el diferencial de presión y el radio al viento máximo asociado al fenómeno para hacer la estimación inicial de la oleada, mientras que los otros nomogramas realizan correcciones que toman en cuenta los efectos de la disminución de profundidad y la dirección y velocidad con la que se mueve la tormenta.

Hsu (2006) utilizó estos nomogramas para estimar las alturas máximas de marea asociados al paso de los huracanes Katrina y Rita, obteniendo resultados muy parecidos con los valores observados.

En segundo término, y en contraste con los modelos empíricos, están los sofisticados modelos numéricos de ciclones tropicales a partir de los cuales se trata de reproducir tanto el clima marítimo de una determinada zona para estimar el nivel de marea de tormenta en el área costera, como para determinar cotas de inundación tierra adentro, entre los cuales se pueden mencionar: el SLOSH (*Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes*) por sus siglas en inglés desarrollado por el *National Weather Service* (NWS).

Según (Jelesnianski et al., 1992) el modelo SLOSH produjo estimaciones razonablemente precisas para alturas máximas de tormenta, sustentadas sobre numerosas validaciones y comparaciones con huracanes históricos, las cuales mostraron que las estimaciones del modelo SLOSH estaban dentro de $\pm 20\%$ de los valores observados.

Otro modelo como el ADCIRC (Luetlich et al., 1992) ha sido utilizado para determinar la importancia e influencia, no solamente de la intensidad del huracán sino del tamaño del mismo, en la generación de la marea de tormenta.

En términos generales, la simulación numérica de la hidrodinámica costera es un importante campo con un crecimiento constante en varios frentes, y que por tanto no puede resumirse completamente en pocas páginas.

Los actuales modelos oceánicos pueden ser extremadamente sofisticados como resultado de cientos de años-persona invertidos en los diversos aspectos de su desarrollo (véase Haidvogel y Beckmann, 1999), habiendo evolucionado hasta un alto grado de sofisticación con una serie de métodos que permiten parametrizar los diversos procesos físicos no resueltos, así como el uso de mallas híbridas a lo largo de la columna de agua. Pain et al. (2005) dan un buen resumen del estado actual en lo que a modelado oceánico se refiere.

8.2.1 Cálculo del componente meteorológico de la marea.

Los movimientos mareales (relativos a las mareas), con frecuencias bien definidas, son continuamente modificados por la acción de agentes climáticos, teniéndose que el intercambio energético entre la atmósfera y las masas de agua, ocurren a diversas escalas espacio-temporales, desde la generación de ondas de viento de período corto, hasta la reducción de gradientes térmicos asociados a la transferencia de energía térmica a los polos.

La importancia relativa de los movimientos mareales y no mareales, es función de la época del año y de la batimetría local, siendo las perturbaciones atmosféricas, por lo general, mayores en invierno y con un mayor efecto cuando actúan sobre aguas someras (poco profundas).

La cota total de agua (suma de la marea, oleaje, caída de la presión, acción del viento y otros factores), puede originar serias inundaciones.

Físicamente, la atmósfera actúa sobre la masa de agua de dos (2) formas distintas:

- Variaciones de la presión atmosférica generan cambios en las fuerzas verticales actuantes sobre la superficie libre del agua (esfuerzos normales), las cuales se transmiten a toda la columna de agua.
- Las fuerzas asociadas al esfuerzo tangencial del viento que son generadas en el sector superficial de la columna de agua y que actúan paralelamente a la superficie libre. El grado de influencia que tienen sobre la columna de agua va a depender del *fetch* disponible para actuar, del tiempo durante el cual el viento esté actuando, de la viscosidad del fluido y del grado de estratificación de la densidad a lo largo de la columna de agua, responsable de controlar la transferencia de momento hacia los sectores medio y profundo de la columna de agua.

La marea meteorológica ("Storm Surge" como se conoce en el idioma inglés) se puede definir como la respuesta del nivel medio del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento (transmitidas por viscosidad al interior del fluido) y a los esfuerzos cortantes normales cuyo origen está asociado al campo de presión atmosférica que esté presente.

Estas "mareas" pueden generar sobre-elevaciones del nivel medio del mar, siendo usual que durante un evento de tormenta o paso de un ciclón tropical, los efectos del viento y de la presión atmosférica no puedan ser identificados por separado (Pugh, 1987), razón por la que se habla en forma conjunta de "marea meteorológica", debiendo recalcar el hecho de que cuando se habla de "marea meteorológica" y concretamente de la acción del viento, no se está haciendo referencia al oleaje generado por viento local o remoto.

El esfuerzo del viento sobre la superficie libre genera un gradiente de la cantidad de movimiento, y aunque el esfuerzo tangencial asociado al viento sobre la superficie, es pequeño, integrado (sumado) sobre una gran masa de agua, puede llegar a ser catastrófico, a tal punto que en casos extremos de huracanes que han pasado por el golfo de México, han llegado a incrementar el nivel medio del mar hasta en 6 m (Dean et al., 1991).

Por lo general, en la determinación de la marea meteorológica se toman en cuenta dos (2) fenómenos o situaciones atmosféricas como lo son los huracanes y los ciclones extratropicales, y adicionalmente, aunque con un orden de magnitud e importancia menor a los dos (2) primeros fenómenos, pudiese considerarse la intensificación ocasional de los vientos alisios como un factor a ser tomado en cuenta a la hora de evaluar la elevación de los niveles de la superficie libre del agua.

La amplitud de la marea de tormenta depende de varios factores físicos del lugar donde se desee conocerla, como lo son: el fondo marino ó batimetría, la línea de costa y su ubicación con respecto a la trayectoria del ciclón, y los vientos asociados a éste.

Es por ello que, en aguas profundas, la marea de tormenta es de poca importancia, debido al ascenso del orden de un (1) cm por cada milibar (o hectopascal) de descenso de la presión atmosférica, pero en cambio, si los vientos del ciclón tropical se presentan sobre regiones marinas donde la profundidad de las aguas es menor de 200 m, puede adquirir valores que sobrepasan un (1) metro.

La estimación h (en metros) más grande que alcanza a ascender el nivel medio del mar por la marea de tormenta (amplitud de la marea de tormenta), se calcula a partir de la velocidad V del viento sostenido (km/h) y del radio máximo del viento (en km).

Con base en el análisis de mediciones de sobre-elevaciones de la marea de tormenta asociada al paso de algunos ciclones tropicales, y de expresiones empíricas propuestas en Estados Unidos y en Japón, se obtuvo la siguiente expresión para estimar la amplitud máxima de la marea de tormenta debida al accionar de un ciclón tropical (Cenapred, 2006):

$$h = (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \quad (8.4)$$

donde:

h = Elevación (en m) más alta que alcanza la marea de tormenta en el mar, cerca de la costa.

R = Radio de máximo viento (en km).

V = Es la velocidad máxima del viento sostenido (en km/h) a 10 m sobre la superficie media del mar, y a una distancia R del centro del ciclón tropical (se puede obtener a partir de la presión central del ciclón tropical, del radio máximo del viento, de la latitud del centro del ciclón tropical y de la velocidad de traslación de éste).

F = Es un factor correctivo por dirección del viento.

De acuerdo con el Cenapred (2006), el valor R del radio de máximo viento (en km), puede calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0} \quad (8.5)$$

donde:

P_0 es la presión central en el centro del fenómeno meteorológico (milibares).

Por otra parte, la velocidad V del viento sostenido (km/h), entendiéndose por viento sostenido al viento medio más grande registrado durante un (1) minuto, a una altura aproximada de diez (10) metros sobre la superficie, se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$V = 20.1834(1013 - p_o)^{0.5} - 0.2618R \sin \phi + 0.5V_d \quad (8.6)$$

donde:

V_d = Velocidad de desplazamiento del ciclón tropical (km/h).

ϕ = Es la latitud en el centro del ciclón (en grados).

El factor correctivo F , se determina a partir del ángulo α que forma la dirección de desplazamiento del ciclón tropical con respecto a la línea de costa próxima al sitio de interés, pudiendo determinarse a partir de la siguiente expresión:

$$F = \begin{cases} 0.6(1 + \sin \alpha) & \text{si } 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \\ 0.6 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (8.7)$$

En la Figura 8-2 (tomada de Cenapred, 2006l) se presenta el ángulo α que existe entre la trayectoria del ciclón tropical y la línea de costa para dos (2) casos distintos de dirección del desplazamiento del fenómeno meteorológico, teniéndose que la región cercana al centro del ciclón tropical es donde se presentan los vientos más intensos, específicamente entre las distancias mitad del radio de máximo viento y el doble de dicho radio, en otras palabras, entre $0.5R$ y $2.5R$, siendo R el radio de máximo viento, conformando la región anillada mostrada en la Figura 8-3.

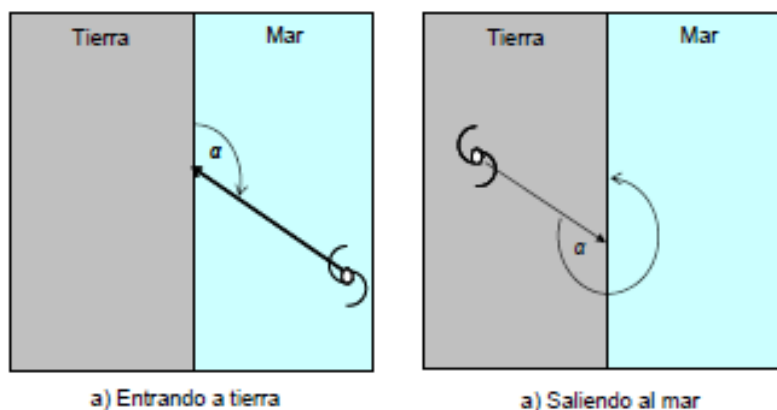


Figura 8-2. Trayectoria de un ciclón tropical con respecto a la línea de costa.

Fuente: Tomada de Cenapred (2006).

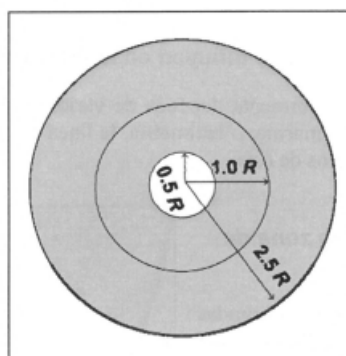


Figura 8-3. Área de localización de los máximos vientos circundando al centro del ciclón tropical.

Fuente: Tomada de Cenapred (2006).

Es importante recalcar que la marea meteorológica constituye sólo una parte de los diferentes agentes que contribuyen a aumentar el nivel total de la cota de agua existente en una determinada localización, teniéndose que el nivel total se calcula de acuerdo a la ecuación 8.1.

8.3 CÁLCULO DE LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR POR OLEAJE O SET-UP.

Para el cálculo del set-up se consideró la formulación de Longuett-Higgins y Steward (1963):

$$S_w = 0,15 d_b - \frac{g^{1/2} (H_o)^2 T}{64\pi d_b^{3/2}} \quad (8.8)$$

donde:

S_w = Sobre-elevación debida al oleaje.

d_b = Profundidad a la que rompe el oleaje.

g = Aceleración de gravedad.

T = Período de la ola.

H_o = Altura de la ola en aguas profundas.

La profundidad de rompiente puede calcularse de acuerdo con la formulación de Weggel (1972), donde:

$$d_b = \frac{H_b}{\frac{1,65}{1 + e^{-1,95m}} - \frac{43,75 (1 - e^{-19m}) H_b}{gT^2}} \quad (8.9)$$

donde m es la pendiente de la playa y H_b es la altura de la ola ya refractada que hay a la profundidad de rompiente, la cual se obtiene a partir de planos de refracción que se deben tener para el área de estudio.

De acuerdo con las diferentes metodologías de cálculo anteriormente descritas, se analizará el caso concreto de isla de Aves (ver aparte 9), en base a la data histórica obtenida a partir de la base de datos HURDAT, de la cual se tomaron los diferentes fenómenos meteorológicos que han afectado a la isla desde 1851, y que por tanto, han generado diferentes intensidades de sobre-elevaciones del mar que en mayor o menor grado han afectado a la morfología de la isla.

Con los cálculos obtenidos se evaluó y caracterizó la respuesta de la isla ante esos eventos extremos, permitiendo entre otros aspectos, establecer que porciones de la isla quedan bajo el agua y que porciones no quedan sumergidas.

9. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE ISLA DE AVES Y CÁLCULO DE LA SOBREELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR POR EFECTO DE LAS DIFERENTES COMPONENTES ASOCIADAS AL PASO DE TORMENTAS TROPICALES Y HURACANES.

9.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE ISLA DE AVES Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.

Isla de Aves, situada al norte del mar Caribe, es la más septentrional de Venezuela, ubicándose a unos 666 km al noreste del puerto de La Guaira (DIGECAFA, 2002), teniendo las siguientes coordenadas geográficas: 15° 40' de latitud norte y 63° 37' de longitud oeste (ver Figura 9-1).

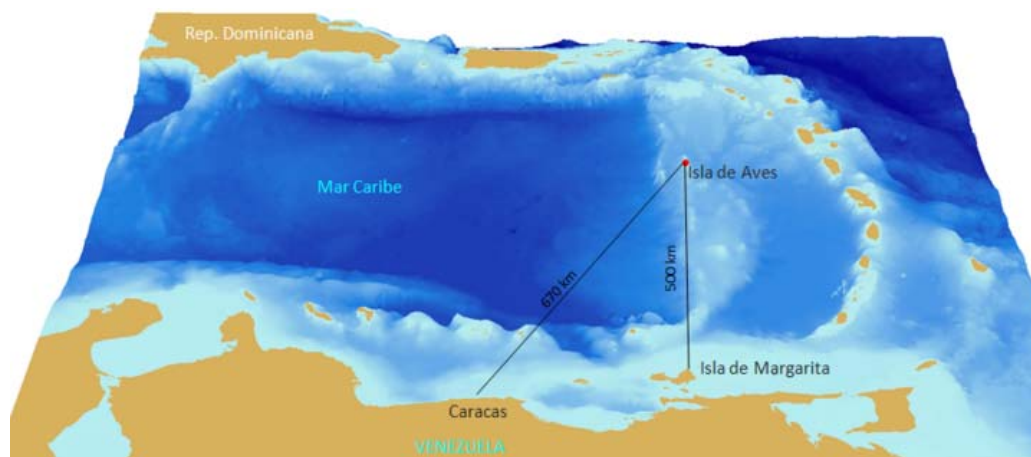


Figura 9-1. Ubicación relativa de isla de Aves en el mar Caribe.

Fuente: Lazo (2014).

Es de origen coralino, contando con un área aproximada de 3,6 hectáreas, y unas dimensiones aproximadas en dirección norte-sur de unos 550 m, mientras que en la zona más ancha tiene unos 140 m de longitud y tiene, tal como se mencionó en el aparte 3, una gran importancia geopolítica al generar por su ubicación, unos 75.000 km² de zona económica exclusiva (ZEE) para Venezuela.

Desde el punto de vista ecológico, es una de las zonas de anidación de la tortuga verde más importante del Caribe, por lo que en 1972 fue declarada como refugio de fauna silvestre.

La isla se forma sobre un basamento calcáreo (fondo duro), a sotavento de un arrecife que actúa como una barrera protectora contra el oleaje, a la vez que permite la acumulación de arenas y escombros. Este sustrato no consolidado está sujeto a los continuos efectos de procesos sedimentarios y erosivos asociados a la acción continua del oleaje, marea y viento, que provocan cambios constantes en la geometría de la isla, afectando en cierto grado su tamaño y forma (Hopley, 2011).

El tamaño del arrecife frangeante que la protege es un factor limitante para el tamaño del cayo. Méndez Baamonde (2006) plantea que: “para que la isla fuese de mayor tamaño, el arrecife frangeante debería extenderse hacia el norte y sur, debiendo existir remanentes de arrecifes frangeantes del Holoceno, los cuales no existen”.

Geomorfológicamente hablando isla de Aves pertenece a la dorsal de Mariner, conformando la cima de un extinto cono volcánico que se eleva desde los 2000 m de profundidad. La cima del norte de esta formación da origen a una meseta en la cual está localizada la isla (ver Figura 9-2).

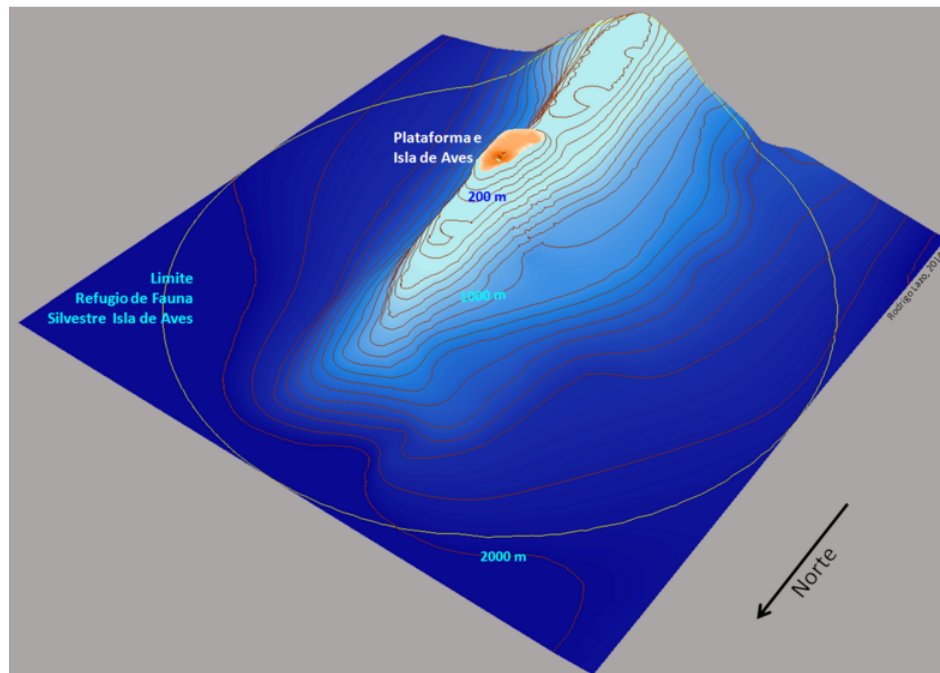


Figura 9-2. Vista tridimensional de la Dorsal Mariner y de la plataforma sobre la que se ubica isla de Aves.

Fuente: Lazo (2014).

9.2 EQUILIBRIO DINÁMICO DE LA ISLA.

Son varios los elementos que contribuyen a mantener a la isla en un continuo “equilibrio dinámico”. Entre dichos elementos destacan:

- El arrecife frangeante que bordea las costas norte, este y sur, y que conforma el elemento estructural de mayor importancia de la isla, en cuanto a su función protectora contra el oleaje.
- La plataforma arrecifal, sobre la cual se asienta la isla y que está conformada por sustratos de caliza dura y compacta.
- Terraza de tormenta, rocas de playa y gravas y escombros calcáreos.

Este “equilibrio dinámico” puede cambiar rápidamente ante la acción de tormentas tropicales o huracanes, cuyos fuertes vientos y oleajes asociados generan una sobre-elevación del nivel del mar, que conforman un conjunto de catalizadores de procesos erosivos de los sedimentos no consolidados que subyacen sobre la plataforma arrecifal, siendo la intensidad y magnitud de dicho proceso erosivo, proporcional al de la intensidad y duración de los campos de viento y oleaje vinculados a estos fenómenos meteorológicos, aunque también pueden actuar en sentido inverso al depositar a su paso grandes bloques calcáreos sobre la plataforma arrecifal, hecho que contribuye en el proceso de formación de las terrazas de tormenta y a la estabilidad general de la isla.

En la Figura 9-3 se muestran ejemplos de los cambios que en la línea de costa ha experimentado la isla en el último medio siglo, mientras que en la Figura 9-4 se

evidencian dichos cambios pero a una escala mensual, lo que pone de manifiesto el alto nivel de dinamismo estructural de buena parte de la isla, siendo importante recalcar el hecho de que los cambios de la línea costera mostrados en la Figura 9-4 para los meses de agosto y septiembre de 2006, no se originaron por el paso de ningún fenómeno meteorológico en las cercanías de la isla, sino que se corresponden con los cambios que en condiciones normales conforman el “equilibrio dinámico” de la isla.

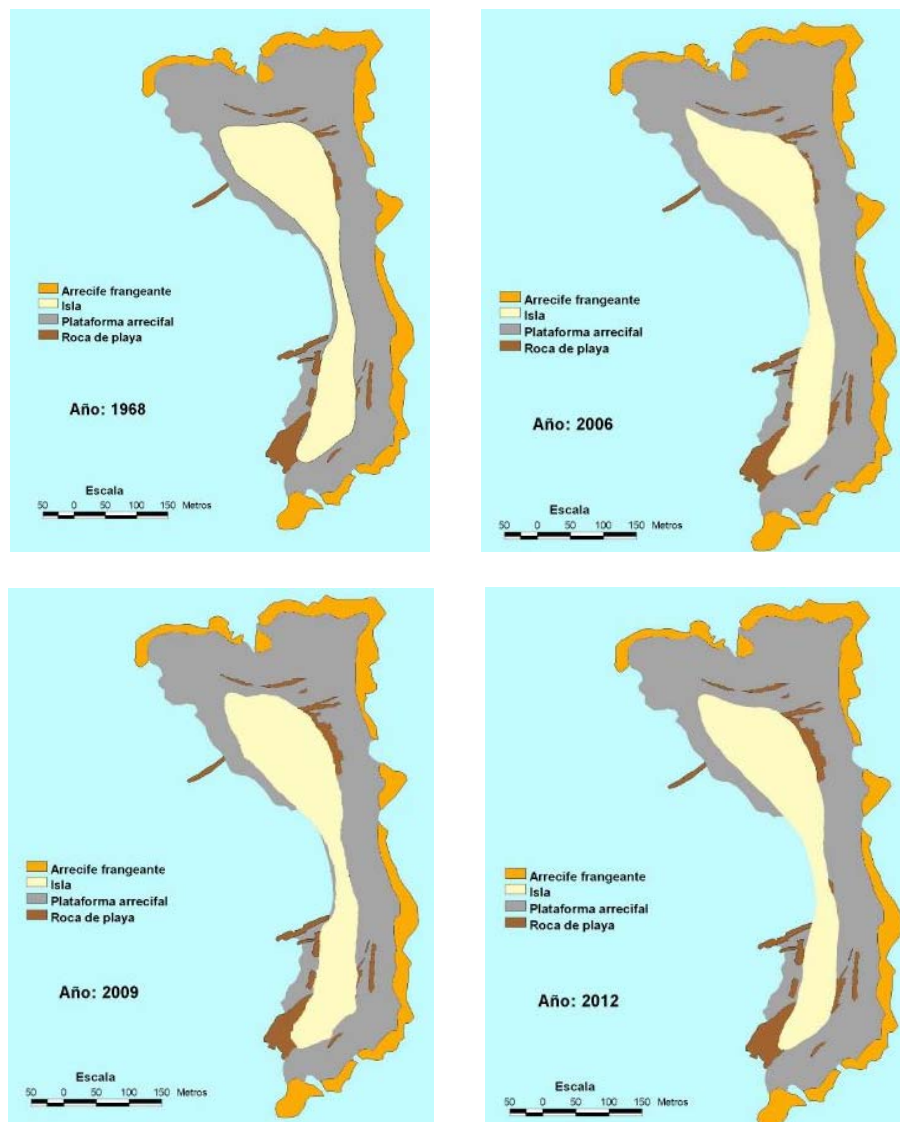


Figura 9-3. Cambios generales de la línea costera. Período: 1968-2012.

Fuente: Página web: www.isladeaves.org.ve.

9.3 CÁLCULO DE LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR ASOCIADO AL PASO DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS CERCA DE ISLA DE AVES.

A partir de la base de datos HURDAT, se identificaron cada uno de los diferentes fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas (unos 120,5 km) de isla de Aves, en el período de tiempo comprendido entre 1851 y 2017 (ver Figura 9-5).

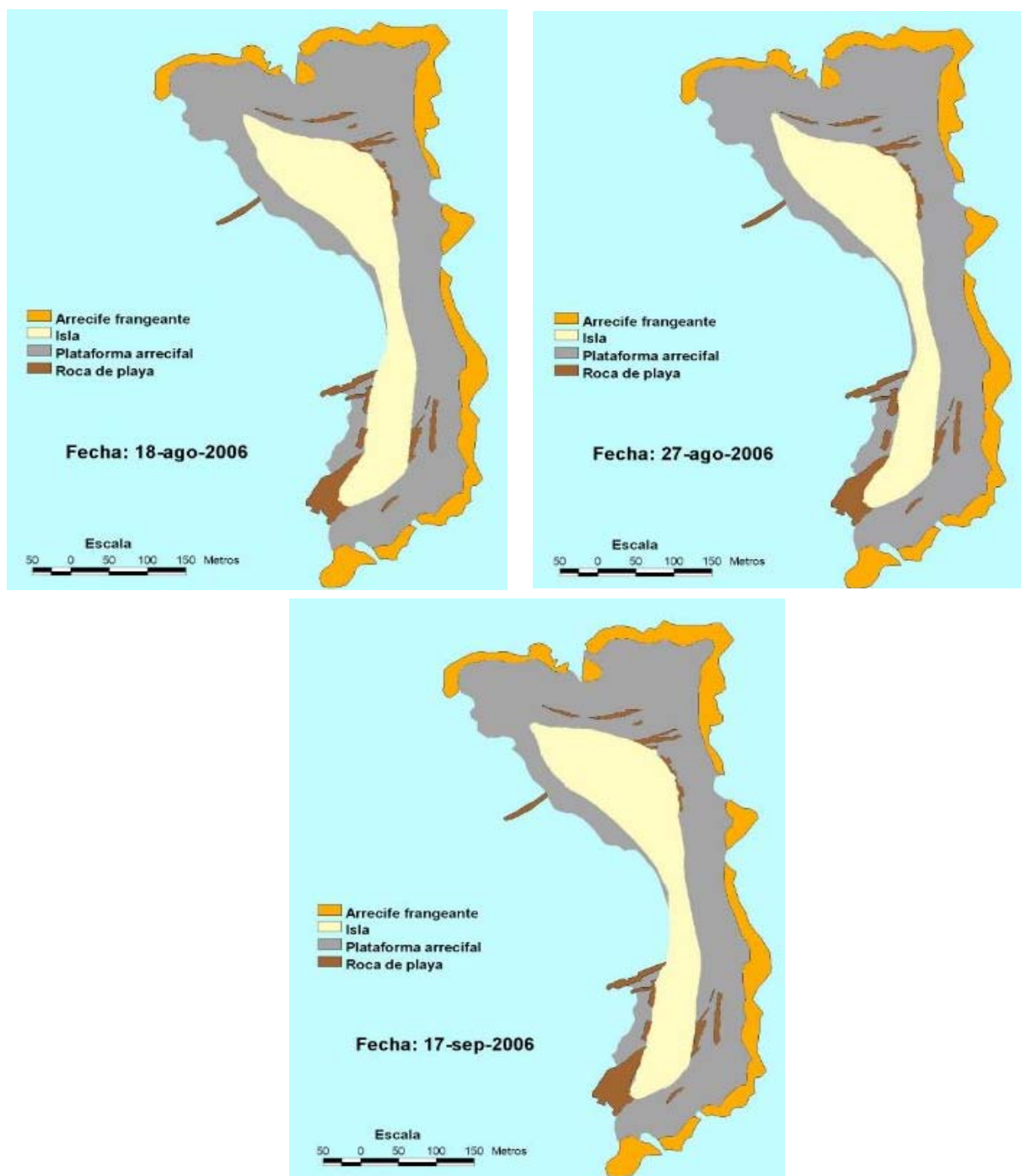


Figura 9-4. Cambios mensuales de la línea costera.

En la Figura 9-5 el centro del círculo (de radio 65 millas náuticas) representa la ubicación de isla de Aves, mientras que los diferentes colores que tienen cada una de las trayectorias están asociados a la intensidad que tenía el fenómeno meteorológico a su paso por la isla.

Para cada uno de esos fenómenos se realizó el cálculo de la sobre-elevación del nivel del mar generada a su paso, de acuerdo a las metodologías descritas en los apartes 8.2 y 8.3, obteniéndose cotas sobre el nivel medio del mar para cada categoría de fenómeno.

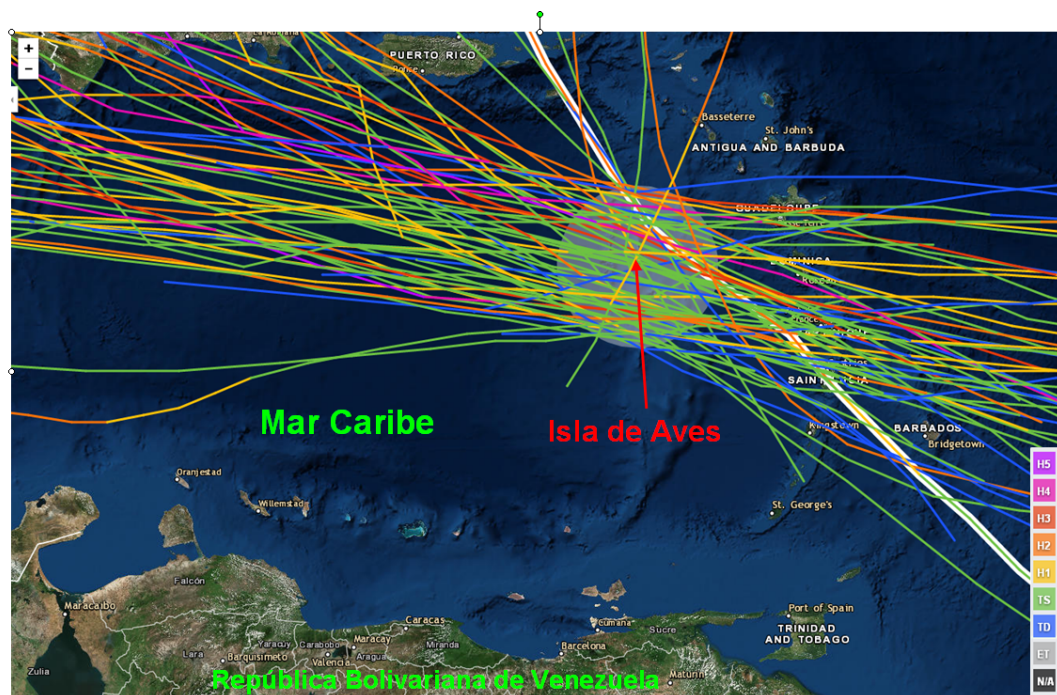


Figura 9-5. Fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves. Lapso: 1851-2017.

Tabla 9-1. Características y fecha de ocurrencia de los fenómenos que han pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves. Lapso: 1851-2017.

Nombre del Evento	Fecha de ocurrencia (dd/mm/yyyy)	Intensidad a su paso por Isla de Aves	Nombre del Evento	Fecha de ocurrencia (dd/mm/yyyy)	Intensidad a su paso por Isla de Aves
Sin nombre	24/08 a 27/08/1855	Tormenta tropical (TS)	Sin nombre	14 al 27/07/1933	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	24 al 30/09/1857	Tormenta tropical (TS)	Sin nombre	20 al 23/08/1934	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	26/08 al 01/09/1864	Huracán grado 1 (H1)	Sin nombre	24 al 27/07/1944	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 14/09/1865	Huracán grado 2 (H2)	Sin nombre	02 al 04/08/1945	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	13 al 18/08/1866	Huracán grado 2 (H2)	Sin nombre	20 a 22/09/1949	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	26/09 al 10/10/1873	Tormenta tropical (TS)	Sin nombre	30/08 a 03/09/1949	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	09 al 16/10/1879	Tormenta tropical (TS)	Charlie	12 al 23/08/1951	Huracán grado 1 (H1)
Sin nombre	04 al 14/08/1880	Tormenta tropical (TS)	Betsy	09 al 21/08/1956	Huracán grado 1 (H1)
Sin nombre	04 al 13/09/1883	Huracán grado 3 (H3)	Ella	30/08 a 07/09/1958	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	12 al 26/09/1889	Tormenta tropical (TS)	Edith	18 a 19/08/1959	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	18 al 25/08/1891	Huracán grado 3 (H3)	Frances	30/09 a 10/10/1961	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	12 al 20/10/1891	Tormenta tropical (TS)	Edith	23 a 29/09/1963	Huracán grado 2 (H2)
Sin nombre	18/09 al 01/10/1894	Huracán grado 3 (H3)	Cleo	20/08 a 05/09/1964	Huracán grado 4 (H4)
Sin nombre	11 al 20/10/1894	Huracán grado 2 (H2)	Inez	21/09 a 11/10/1966	Huracán grado 4 (H4)
Sin nombre	22 al 30/08/1895	Tormenta tropical (TS)	Beulah	05 al 22/09/1967	Huracán grado 2 (H2)
Sin nombre	30/08 al 11/09/1896	Huracán grado 2 (H2)	Holly	14 a 21/09/1969	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	22 al 30/09/1896	Tormenta tropical (TS)	Dorothy	17 al 23/08/1970	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	05 al 20/09/1898	Huracán grado 2 (H2)	Carmen	29/08 a 10/09/1974	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	29/08 al 08/09/1899	Huracán grado 1 (H1)	David	25/08 a 08/09/1979	Huracán grado 5 (H5)
Sin nombre	04 al 13/07/1901	Tormenta tropical (TS)	Gert	07 al 15/09/1981	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 16/08/1903	Huracán grado 3 (H3)	Dennis	07 al 22/08/1981	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	21/09 al 07/10/1908	Huracán grado 1 (H1)	Gilbert	08 al 20/09/1988	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 09/03/1908	Huracán grado 1 (H1)	Cindy	14 al 17/08/1993	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	23 al 29/08/1910	Tormenta tropical (TS)	Debby	09 al 11/09/1994	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	05 al 23/08/1915	Huracán grado 2 (H2)	Hortense	03 al 16/09/1996	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	10 al 22/07/1916	Tormenta tropical (TS)	Helene	15 al 25/09/2000	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	27/08 al 02/09/1916	Huracán grado 1 (H1)	Jeanne	13 al 29/09/2004	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 15/10/1916	Huracán grado 1 (H1)	Dean	13 al 23/08/2007	Huracán grado 3 (H3)
Sin nombre	20 al 30/09/1917	Tormenta tropical (TS)	Erika	01 al 04/09/2009	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	09 al 14/09/1918	Tormenta tropical (TS)	Emily	02 al 07/08/2011	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	02 al 16/09/1919	Depresión tropical (TD)	Isaac	20/08 a 01/09/2012	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	16 al 28/08/1924	Depresión tropical (TD)	Rafael	12 al 26/10/2012	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	22/07 al 02/08/1926	Huracán grado 1 (H1)	Chantal	07 al 10/07/2013	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	29/08 al 17/09/1930	Huracán grado 2 (H2)	Bertha	29/07 a 09/08/2014	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	10 al 19/08/1931	Tormenta tropical (TS)	Erika	24 a 28/08/2015	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	30/10 al 14/11/1932	Tormenta tropical (TS)	Maria	16 al 26/09/2017	Huracán grado 5 (H5)

El valor de la sobre-elevación asociada a los cambios y presión del viento se obtuvo a partir del cálculo de cada una de las variables incluidas dentro de las ecuaciones que caracterizan la acción del fenómeno (aparte 8.2), mientras que para la componente asociada al oleaje, se utilizaron los planos de refracción del oleaje desarrollados por Incostas (1997), los cuales se muestran en el anexo 11.8 conjuntamente con la batimetría que rodea a la isla y la topografía de la misma, sin los cuales hubiese sido imposible calcular la altura de ola significativa del oleaje ya afectada por los efectos de refracción del oleaje debido a los cambios de profundidad existente en las cercanías de la isla.

En la Tabla 9-2 se presentan los cálculos de sobre-elevación asociados tanto a la acción del campo de vientos y variación de la presión, como los vinculados a la acción del oleaje, así como la sobre-elevación total del nivel del mar para cada uno de los setenta y dos (72) fenómenos meteorológicos que pasaron a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves en el lapso de tiempo comprendido entre los años 1851 y 2017, mientras que en la Tabla 9-3 se presenta un resumen de estos registros, agrupándolos de acuerdo con la categoría que tenía el fenómeno meteorológico para el momento en que pasó más cerca de isla de Aves.

A partir de la información contenida en la Tabla 7-2, Tabla 9-1 y Tabla 9-2 se pueden hacer las siguientes acotaciones:

- El 62,5% del total de fenómenos meteorológicos que pasaron a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves, tuvieron una intensidad igual o menor al de una tormenta tropical, generando en promedio una sobre-elevación total de la superficie libre, sobre el nivel medio del mar, del orden de 1,80 m, con un máximo puntual de 2,50 m correspondiente a un fenómeno que pasó a 7 km al norte de la isla.
- La sobre-elevación asociada al paso de “huracanes mayores”, es decir, huracanes grado 3, 4 o 5 en la escala de Saffir-Simpson, generaron a su paso sobre-elevaciones promedio superiores a 3,3 m con un máximo puntual de 4,70 m vinculado al paso a escasos 8 km de la isla, de un huracán grado 3.
- A cada una de las sobre-elevaciones calculadas, y a los efectos de considerar el escenario más crítico, hay que sumarle el aumento periódico que experimenta la superficie del mar en condiciones normales (marea astronómica) que para el caso del área donde se ubica isla de Aves puede alcanzar en los momentos de pleamar, valores máximos del orden de 0,15 m por encima del nivel medio del mar.
- Los valores obtenidos, si bien no pueden ser directamente confirmados contra mediciones del aumento del nivel del mar, si pueden ser verificados por observaciones indirectas.

Los valores de sobre-elevación obtenidos no pueden superar la cota de la primera cubierta de la estación científica naval que desde 1978 se instaló en la isla, ya que en caso de que eso hubiera ocurrido, se tendrían reportes que hubieran documentado el hecho, sobre todo por los daños que esto hubiera causado a la estación.

Dicha estación se muestra en la Figura 9-6 a partir de la cual puede estimarse, tomando como referencia la información que se menciona en la página web www.isladeaves.org.ve acerca de que el faro y el racon de la estación se encuentran a 19 m de altura sobre el nivel medio del mar, que la losa de piso que está conectada con las columnas de hormigón, tiene una cota del orden de 7 m,

mientras que la cota de la losa de la primera cubierta es del orden de 8 m sobre el nivel medio del mar, por lo que los mayores valores de sobre-elevación estimados no sobrepasarían la cota del puente que da acceso a la estación.

Tabla 9-2. Sobre-elevaciones totales asociadas a cada fenómeno meteorológico que ha pasado a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves. Lapso: 1851-2017.

Nombre del Fenómeno	Fecha de ocurrencia (dd/mm/yyyy)	Intensidad a su paso por Isla de Aves	Sobre-elevación por acción del viento y la presión (h) (m)	Sobre-elevación debida al oleaje (m)	Sobre-elevación total por acción del viento presión y oleaje (m)	Posición más cercana con respecto a Isla de Aves
Sin nombre	24/08 a 27/08/1855	Tormenta tropical (TS)	0.76	0.99	1.75	Pasó a 88 km al sur
Sin nombre	24 al 30/09/1857	Tormenta tropical (TS)	0.79	1.19	1.97	Pasó a 38 km al norte
Sin nombre	26/08 al 01/09/1864	Huracán grado 1 (H1)	1.01	1.09	2.10	Pasó a 73 km al sur
Sin nombre	06 al 14/09/1865	Huracán grado 2 (H2)	1.44	1.14	2.58	Pasó a 85 km al noreste
Sin nombre	13 al 18/08/1866	Huracán grado 2 (H2)	1.46	1.23	2.69	Pasó a 105 km al sur
Sin nombre	26/09 al 10/10/1873	Tormenta tropical (TS)	0.75	0.94	1.69	Pasó a 72 km al sur
Sin nombre	09 al 16/10/1879	Tormenta tropical (TS)	0.81	1.11	1.92	Pasó a 88 km al sur
Sin nombre	04 al 14/08/1880	Tormenta tropical (TS)	0.83	1.10	1.93	Pasó a 35 km al noreste
Sin nombre	04 al 13/09/1883	Huracán grado 3 (H3)	3.43	1.26	4.69	Pasó a 8 km al sur
Sin nombre	12 al 26/09/1889	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.81	1.53	Pasó a 28 km al sur
Sin nombre	18 al 25/08/1891	Huracán grado 3 (H3)	1.88	1.22	3.10	Pasó a 13 km al noreste
Sin nombre	12 al 20/10/1891	Tormenta tropical (TS)	0.73	0.84	1.57	Pasó a 28 km al noreste
Sin nombre	18/09 al 01/10/1894	Huracán grado 3 (H3)	3.38	1.29	4.67	Pasó a 5 km al sur
Sin nombre	11 al 20/10/1894	Huracán grado 2 (H2)	1.37	1.06	2.43	Pasó a 35 km al noreste
Sin nombre	22 al 30/08/1895	Tormenta tropical (TS)	0.77	1.13	1.90	Pasó a 120 km al suroeste
Sin nombre	30/08 al 11/09/1896	Huracán grado 2 (H2)	1.37	1.07	2.44	Pasó a 25 km al noreste
Sin nombre	22 al 30/09/1896	Tormenta tropical (TS)	0.75	1.05	1.79	Pasó a 115 km al norte
Sin nombre	05 al 20/09/1898	Huracán grado 2 (H2)	1.44	1.14	2.58	Pasó a 77 km al noreste
Sin nombre	29/08 al 08/09/1899	Huracán grado 1 (H1)	0.96	1.14	2.10	Pasó a 107 km al norte
Sin nombre	04 al 13/07/1901	Tormenta tropical (TS)	1.39	1.09	2.48	Pasó a 7 km al norte
Sin nombre	06 al 16/08/1903	Huracán grado 3 (H3)	1.89	1.32	3.21	Pasó a 100 km al sur
Sin nombre	21/09 al 07/10/1908	Huracán grado 1 (H1)	0.89	0.99	1.88	Pasó a 75 km al norte
Sin nombre	06 al 09/03/1908	Huracán grado 1 (H1)	0.87	0.61	1.48	Pasó a 20 km al este
Sin nombre	23 al 29/08/1910	Tormenta tropical (TS)	0.80	1.10	1.90	Pasó a 18 km al sur
Sin nombre	05 al 23/08/1915	Huracán grado 2 (H2)	1.50	1.19	2.68	Pasó a 20 km al noreste
Sin nombre	10 al 22/07/1916	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.78	1.50	Pasó a 45 km al noreste
Sin nombre	27/08 al 02/09/1916	Huracán grado 1 (H1)	1.29	1.28	2.57	Pasó a 30 km al sur
Sin nombre	06 al 15/10/1916	Huracán grado 1 (H1)	1.38	0.87	2.25	Pasó a 5 km al noreste
Sin nombre	20 al 30/09/1917	Tormenta tropical (TS)	0.77	1.03	1.80	Pasó a 43 km al sur
Sin nombre	09 al 14/09/1918	Tormenta tropical (TS)	0.74	0.92	1.67	Pasó a 15 km al sur
Sin nombre	02 al 16/09/1919	Depresión tropical (TD)	0.69	0.90	1.59	Pasó a 85 km al norte
Sin nombre	16 al 28/08/1924	Depresión tropical (TD)	0.72	0.89	1.61	Pasó a 32 km al noreste
Sin nombre	22/07 al 02/08/1926	Huracán grado 1 (H1)	1.12	1.27	2.38	Pasó a 30 km al norte
Sin nombre	29/08 al 17/09/1930	Huracán grado 2 (H2)	1.40	1.09	2.49	Pasó a 72 km al noreste
Sin nombre	10 al 19/08/1931	Tormenta tropical (TS)	0.81	1.24	2.05	Pasó a 83 km al suroeste
Sin nombre	30/10 al 14/11/1932	Tormenta tropical (TS)	0.79	1.05	1.84	Pasó a 109 km al sur
Sin nombre	14 al 27/07/1933	Depresión tropical (TD)	0.75	1.18	1.93	Pasó a 50 km al norte
Sin nombre	20 al 23/08/1934	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.90	1.62	Pasó a 97 km al suroeste
Sin nombre	24 al 27/07/1944	Tormenta tropical (TS)	0.80	1.10	1.90	Pasó a 111 km al sur
Sin nombre	02 al 04/08/1945	Tormenta tropical (TS)	0.78	0.98	1.76	Pasó a 56 km al noreste
Sin nombre	20 a 22/09/1949	Tormenta tropical (TS)	0.77	1.03	1.80	Pasó a 10 km al sur
Sin nombre	30/08 a 03/09/1949	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.89	1.61	Pasó a 94 km al suroeste
Charlie	12 al 23/08/1951	Huracán grado 1 (H1)	1.12	1.25	2.36	Pasó a 12 km al sur
Betsy	09 al 21/08/1956	Huracán grado 1 (H1)	1.08	1.21	2.29	Pasó a 103 km al norte
Ella	30/08 a 07/09/1958	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.97	1.69	Pasó a 35 km al norte
Edith	18 a 19/08/1959	Tormenta tropical (TS)	0.75	0.85	1.59	Pasó a 143 km al noreste
Frances	30/09 a 10/10/1961	Tormenta tropical (TS)	0.69	0.85	1.54	Pasó a 42 km al norte
Edith	23 a 29/09/1963	Huracán grado 2 (H2)	0.98	1.03	2.01	Pasó a 84 km al suroeste
Cleo	20/08 a 05/09/1964	Huracán grado 4 (H4)	1.88	1.42	3.30	Pasó a 63 km al norte
Inez	21/09 a 11/10/1966	Huracán grado 4 (H4)	2.07	1.18	3.25	Pasó a 80 km al noreste
Beulah	05 al 22/09/1967	Huracán grado 2 (H2)	1.28	1.18	2.47	Pasó a 73 km al suroeste
Holly	14 a 21/09/1969	Depresión tropical (TD)	0.72	0.93	1.65	Pasó a 32 km al sureste
Dorothy	17 al 23/08/1970	Tormenta tropical (TS)	0.81	1.02	1.83	Pasó a 95 km al sur
Carmen	29/08 a 10/09/1974	Depresión tropical (TD)	0.81	1.11	1.93	Pasó a 85 km al noreste
David	25/08 a 08/09/1979	Huracán grado 5 (H5)	2.50	1.40	3.90	Pasó a 23 km al norte
Gert	07 al 15/09/1981	Tormenta tropical (TS)	0.90	1.24	2.14	Pasó a 58 km al norte
Dennis	07 al 22/08/1981	Depresión tropical (TD)	0.75	1.15	1.90	Pasó a 58 km al sur
Gilbert	08 al 20/09/1988	Tormenta tropical (TS)	0.98	1.08	2.06	Pasó a 55 km al sur
Cindy	14 al 17/08/1993	Tormenta tropical (TS)	0.70	1.07	1.77	Pasó a 51 km al sur
Debby	09 al 11/09/1994	Tormenta tropical (TS)	0.80	1.22	2.03	Pasó a 101 km al suroeste
Hortense	03 al 16/09/1996	Tormenta tropical (TS)	0.94	1.11	2.04	Pasó a 71 km al norte
Helene	15 al 25/09/2000	Depresión tropical (TD)	0.78	1.24	2.03	Pasó a 82 km al norte
Jeanne	13 al 29/09/2004	Tormenta tropical (TS)	0.85	0.89	1.74	Pasó a 116 km al noreste
Dean	13 al 23/08/2007	Huracán grado 3 (H3)	1.69	1.37	3.05	Pasó a 94.5 km al suroeste
Erika	01 al 04/09/2009	Tormenta tropical (TS)	0.72	1.00	1.72	Pasó a 130 km al norte
Emily	02 al 07/08/2011	Tormenta tropical (TS)	0.78	0.96	1.74	Pasó a 17 km al sur
Isaac	20/08 a 01/09/2012	Tormenta tropical (TS)	0.82	0.95	1.77	Pasó a 23 km al sureste
Rafael	12 al 26/10/2012	Tormenta tropical (TS)	0.75	0.86	1.62	Pasó a 7 km al sur
Chantal	07 al 10/07/2013	Tormenta tropical (TS)	0.74	0.81	1.55	Pasó a 45 km al sur
Bertha	29/07 a 09/08/2014	Tormenta tropical (TS)	1.44	1.00	2.44	Pasó a 5 km al noreste
Erika	24 a 28/08/2015	Tormenta tropical (TS)	0.76	0.98	1.74	Pasó a 88 km al norte
Maria	16 al 30/09/2017	Huracán grado 5 (H5)	2.66	1.12	3.78	Pasó a 89 km al noreste

Tabla 9-3. Sobre-elevación total del nivel de mar en isla de Aves asociada a la intensidad de los fenómenos meteorológicos sin tomar en cuenta la variación de la marea.

Estadísticas de la sobre-elevación total para cada tipo de fenómeno	Número de fenómenos	Promedio (m)	Maximo (m)	Minimo (m)	Distancia a la que pasó el evento que generó mayor sobre-elevación
Depresión tropical	7	1.81	2.03	1.59	82 km al norte.
Tormenta tropical	38	1.82	2.48	1.50	7 km al norte.
Huracan grado 1	9	2.21	2.57	1.48	30 km al sur.
Huracan grado 2	9	2.49	2.69	2.01	105 km al sur.
Huracan grado 3	5	3.74	4.69	3.05	8 km al sur.
Huracan grado 4	2	3.28	3.30	3.25	63 km al norte.
Huracan grado 5	2	3.84	3.90	3.78	23 km al norte.

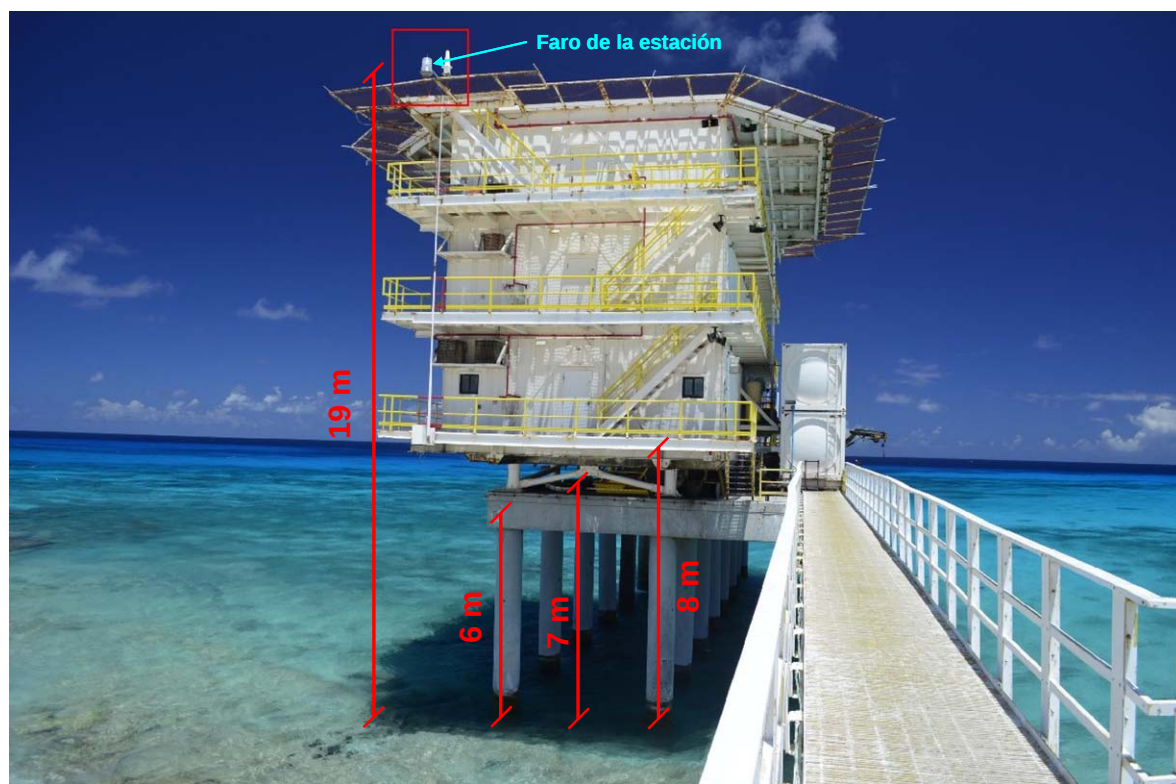
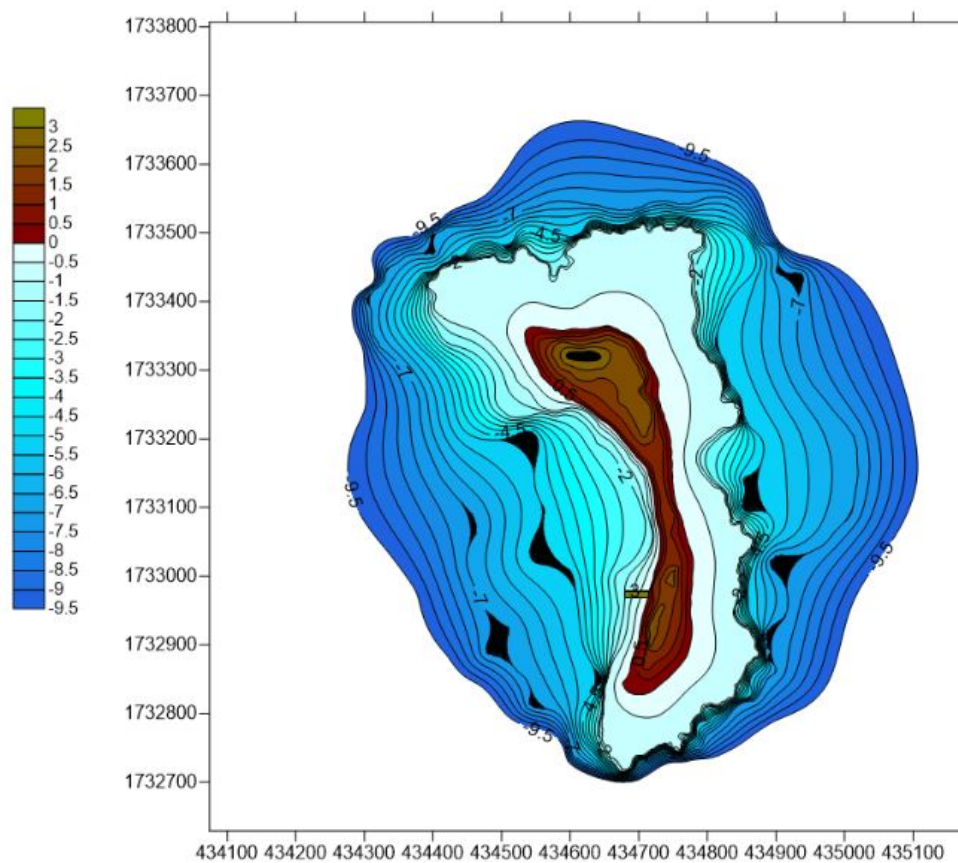


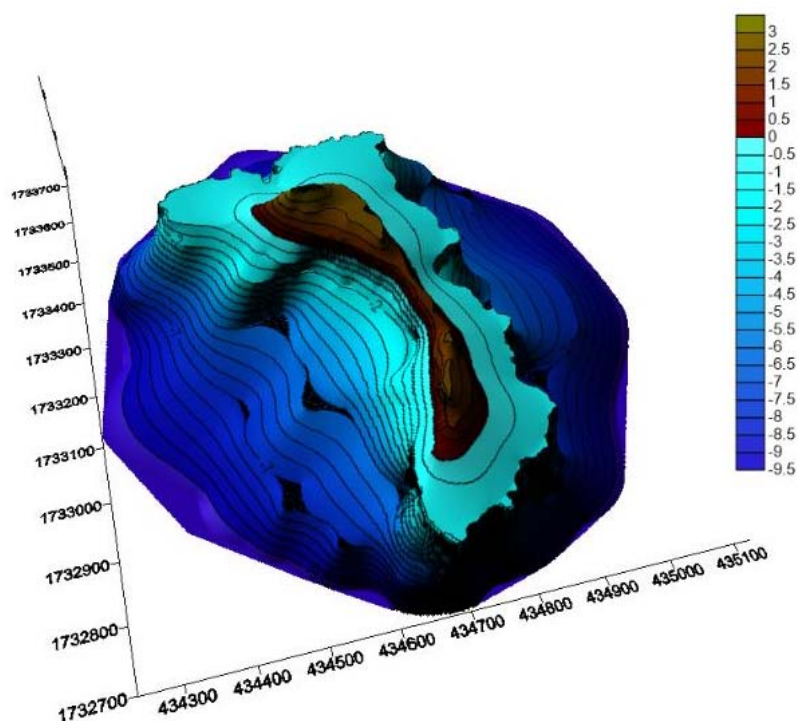
Figura 9-6. Panorámica de la base científico naval instalada en isla de Aves.

Fuente: Página web: www.isladeaves.org.ve y modificada por el autor.

Con la data recolectada, procesada y analizada se procedió a realizar una serie de simulaciones a los fines de visualizar la condición general de la isla cuando ésta es afectada por algún fenómeno meteorológico, viendo que partes de la isla quedan sumergidas y cuales permanecen sobre el nivel que alcanza la superficie del mar en los momentos de afectación (ver Figura 9-7 a Figura 9-10), pudiendo apreciarse que el relieve de la isla queda totalmente sumergido cuando ha sido afectada por huracanes de grado 3 o superior cuya acción está asociada a sobre-elevaciones del nivel medio del mar superiores a los 3 m.

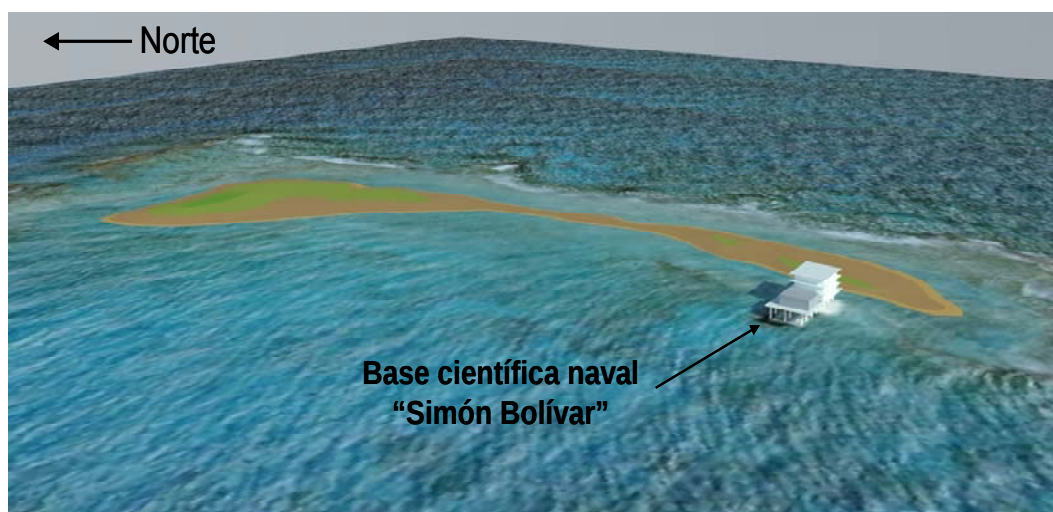


Vista de planta de la isla y áreas circundantes.

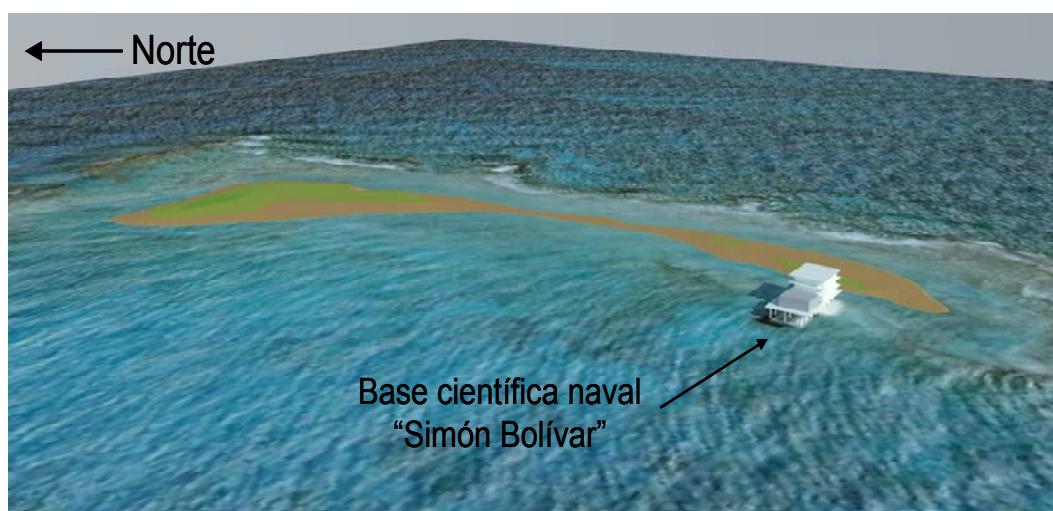


Vista tridimensional de la isla y áreas circundantes.

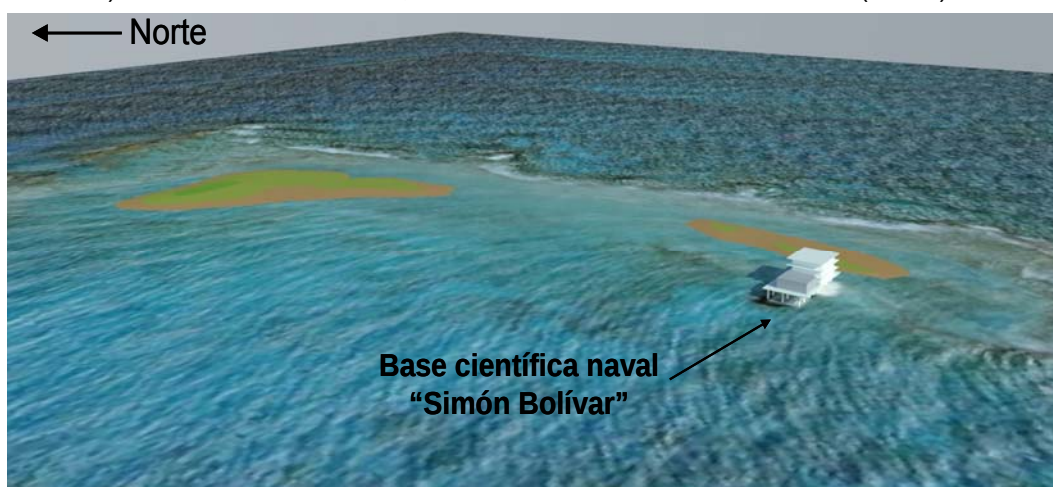
Figura 9-7. Topobatismetría de isla de Aves referida al nivel medio del mar.



a) Sobre-elevación de 0,5 m sobre el nivel medio del mar (NMM).

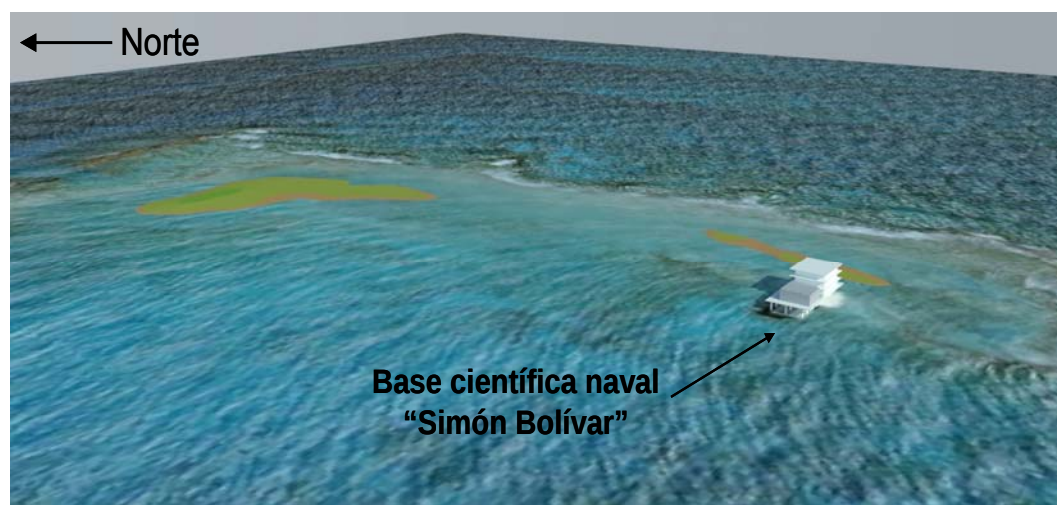


b) Sobre-elevación de 0,75 m sobre el nivel medio del mar (NMM).

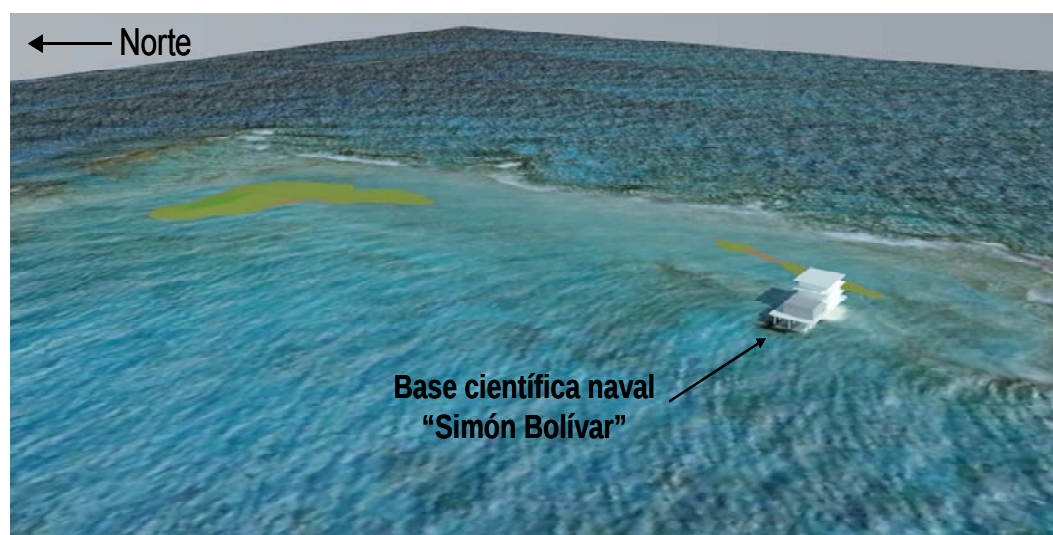


c) Sobre-elevación de 1,0 m sobre el nivel medio del mar (NMM).

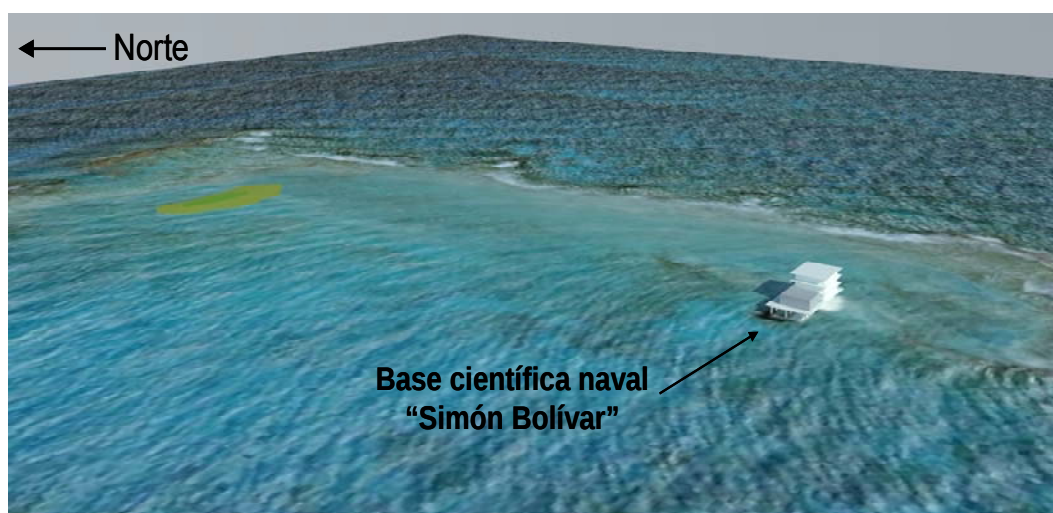
Figura 9-8. Relieve de isla de Aves que permanece emergido luego de ser afectado por eventos que generan una sobre-elevación del nivel medio del mar de:
a) 0,5 m), b) 0,75 m, c) 1,0 m.



a) Sobre-elevación de 1,5 m sobre el nivel medio del mar (NMM).



b) Sobre-elevación de 1,75 m sobre el nivel medio del mar (NMM).



c) Sobre-elevación de 2,0 m sobre el nivel medio del mar (NMM).

Figura 9-9. Relieve de isla de Aves que permanece emergido luego de ser afectado por eventos que generan una sobre-elevación del nivel medio del mar de: a) 1,5 m), b) 1,75 m, c) 2,0 m.



a) Sobre-elevación de 2,25 m sobre el nivel medio del mar (NMM).



b) Sobre-elevación de 2,5 m sobre el nivel medio del mar (NMM).



c) Sobre-elevación de 2,75 m sobre el nivel medio del mar (NMM).

Figura 9-10. Relieve de isla de Aves que permanece emergido luego de ser afectado por eventos que generan una sobre-elevación del nivel medio del mar de:
a) 2,25 m), b) 2,5 m, c) 2,75 m

Los resultados obtenidos con las simulaciones permiten concluir lo siguiente:

- Tomando en cuenta que entre 1851 y Septiembre 30 de 2017 la base de datos de la NOAA ha documentado 1811 fenómenos meteorológicos (desde depresiones tropicales hasta huracanes grado 5) en la cuenca Atlántica, la probabilidad de que cualquier tipo de fenómeno afecte a la isla (entendiendo por afectación que el fenómeno pase a menos de 65 millas náuticas de distancia de la isla), es de $3,98\% \approx 4,0\%$.
- Dado que las simulaciones hechas permitieron determinar que únicamente ante la influencia de huracanes grado 3 o superior la isla quedaría totalmente bajo el agua, la probabilidad de que eso ocurra es aún menor, situándose en un $0,5\%$, lo que es claramente indicativo que la estabilidad estructural actual de la morfología de la isla no corre ningún tipo de peligro, dado que la misma tiene una capacidad de autorecuperación luego de que ha sido afectada por los fenómenos estudiados.

En otras palabras, si se asume que la “amenaza” en este caso es el fenómeno conocido como “marea de tormenta” asociada al paso de fenómenos meteorológicos extremos y que la función de peligro $P(i)$, entendiendo el peligro como la probabilidad anual de que se presente un evento que exceda la intensidad i sin avanzar al siguiente nivel, las simulaciones mostradas en las figuras previas, permiten la caracterización de dicho peligro, teniéndose que la sobre-elevación de 1,75 m corresponde a la caracterización del peligro estudiado para un período de retorno asociado del orden de 3 años, la sobre-elevación de 2,25 m corresponde aproximadamente a la caracterización del peligro asociado a un período de retorno de 6 años, mientras que la sobre-elevación de 2,75 m corresponde aproximadamente a la caracterización del peligro asociado a un período de retorno del orden de 12 años.

Estos escenarios permiten a su vez la posterior determinación del grado de vulnerabilidad del área costera estudiada y la consecuente evaluación del riesgo asociado a la “amenaza” considerada.

- El análisis de los datos, también muestra que la probabilidad de afectación de la isla por efectos de estos fenómenos es independiente de si el año en que ocurrieron puede ser caracterizado como año “El Niño” o “La Niña”. El análisis de los fenómenos ocurridos desde 1951 hasta el presente evidenció que en años “El Niño” la isla fue afectada por 8 fenómenos, en años “La Niña” fue afectada por 10 fenómenos, mientras que en años “neutros” fue afectada por 12 eventos.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

10.1 CONCLUSIONES.

A partir de los análisis realizados en el presente trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- Se puede predecir con una alta certidumbre como va a ser un año, desde el punto de vista de si será un “año Niño”, un “año Niña” o un “año Neutral” con las consideraciones asociadas en cuanto al número e intensidad de los fenómenos que pudieran presentarse en el período de estudio, siendo relevante el hecho de que la predicción puede hacerse sin la utilización de grandes y complicados modelos climáticos, sino empleando únicamente los datos de anomalías de la temperatura superficial del mar que la NOAA registra periódicamente en el océano Pacífico.

Es importante resaltar que la metodología planteada no pretende prescindir del uso de modelos climáticos globales, indispensables para poder conocer con la mayor certidumbre posible la dinámica atmosférica de la Tierra, pero si aporta insumos importantes para hacer pronósticos a corto plazo de lo que será la venidera temporada de huracanes en la cuenca Atlántica, con un ínfimo esfuerzo computacional y humano.

- Los diferentes mapas obtenidos para algunas de las principales propiedades de los fenómenos meteorológicos estudiados, así como los mapas generales de probabilidad de excedencia anual para las diferentes categorías de intensidad de los mismos, permitieron identificar tres (3) sectores que son particularmente sensibles al paso de los huracanes, tanto en número como en el grado de intensidad de los mismos, siendo ellos: el estrecho de Yucatán, el área central del golfo de México, y la franja costera que abarca el norte del estado de la Florida, Georgia y Carolina del Norte y del Sur.

En el caso específicamente estudiado de isla de Aves, se aplicó y validó una metodología asociada al cálculo de la sobre-elevación puntual del mar en áreas costeras, por efectos del paso de un fenómeno meteorológico determinado, a la vez que se evaluó la respuesta de esta estratégica isla ante el paso de los fenómenos meteorológicos estudiados. Se pudieron estimar entre otros aspectos que la incidencia de huracanes de grado 2 sobre la isla, tienen un período de retorno del orden de 10 años y sobre-elevaciones promedio del nivel del mar del orden de 2,5 m, los cuales prácticamente dejan a la isla totalmente sumergida.

- La estabilidad estructural de la isla no parece estar en peligro, tal como lo demuestra el hecho de que si bien cada 10 años en promedio, la isla ha quedado casi en más de un 90% sumergida, luego de la afectación por estos fenómenos donde entre otros aspectos se “lava” buena parte de la cubierta arenosa de la isla, el continuo accionar del oleaje y del viento, en conjunción con la función protectora y potenciadora de retención de arena que tiene el arrecife frangeante que bordea a buena parte del perímetro de la isla, permiten que el material lavado sea restituido con nuevos aportes de arena.
- La metodología aplicada expresamente a isla de Aves, puede ser igualmente aplicada a cualquier área costera continental de la República Bolivariana de Venezuela, y a partir de los resultados obtenidos, pueden fácilmente generarse “mapas de peligro” y estimaciones de riesgos ante la amenaza estudiada.

10.2 RECOMENDACIONES.

- El rumbo que sigue la actual política energética venezolana, asociada en estos momentos en buena medida a la explotación gasífera costa afuera, conlleva a tener el mejor conocimiento posible de las condiciones oceanográficas y meteorológicas en las zonas de interés, por lo cual se propone la construcción de una gran y única base de datos, (que pudiera ser “manejada o gerenciada” por PDVSA) con la cual se pueda “alimentar” a poderosas herramientas de análisis tridimensional, tales como modelos globales, de mesoescala, o locales, que permitan la generación de valores predictivos de todas las variables de interés y con la mayor precisión posible, lo cual redundará en una menor incertidumbre, y por ende en menores costos al momento de diseñar y construir las obras de ingeniería proyectadas.

Lo expuesto en el párrafo anterior va asociado directamente a la necesidad de hacer mediciones de los diferentes parámetros oceanográficos y meteorológicos en las áreas de interés, por espacios de tiempo lo suficientemente extensos (2 a 3 años como mínimo).

- Lo anterior cobra mayor importancia si se toma en cuenta que en Bécemberg (2012) se encontró que si bien el número y porcentaje de eventos meteorológicos que han pasado “cerca” o han “tocado” territorio venezolano entre los años 1851 y 2016 son históricamente bajos; 44 y 2,9% respectivamente, a partir de 1966 ha habido un incremento, pasando de un porcentaje menor a 2% antes de 1965, a casi 5% a partir de 1966.

11. ANEXOS

11.1 CONCEPTOS ASOCIADOS AL RIESGO, SU METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y SU GERENCIA.

El siguiente glosario de términos fue obtenido del informe de Naciones Unidas relacionado con las estrategias internacionales para reducción de desastres (EIRD, 2004), así como de reportes de la oficina del coordinador de Naciones Unidas para el socorro en casos de desastres (UNDRO, 1979) y de la Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura (UNESCO).

- Amenazas o peligros naturales (*Hazard-H*): Evento físico potencialmente perjudicial de naturaleza natural o antrópica que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental.

Pueden ser expresadas en términos cualitativos (niveles de peligrosidad tales como: bajo, moderado, alto o extremo), o en términos cuantitativos asociados a su probabilidad de ocurrencia en una localización determinada y durante un determinado período de tiempo.

- Vulnerabilidad (*Vulnerability-V*): Conjunto de condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que incrementan la susceptibilidad y exposición de un área o comunidad al impacto negativo de amenazas.
- Riesgo: Probabilidad de ocurrencia de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental), como resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad.

Por su parte, la UNESCO y la UNDRO (1979) en la reunión de expertos que convocaron con la finalidad de unificar las distintas definiciones existentes, amplían el concepto de riesgo, introduciendo los conceptos de riesgo específico (*Specific Risk-Rs*), elementos en riesgo (*Elements at Risk-E*) y de riesgo total (*Total Risk-Rt*), a los fines de incorporarlos dentro de una evaluación más integral del riesgo.

Técnicamente, riesgo se define como la probabilidad matemática de que se produzca un resultado específico multiplicado por la magnitud del impacto de esa ocurrencia, teniéndose que el concepto cultural del determinismo científico a través de la eliminación de la incertidumbre y la evaluación de opciones futuras indeterminadas, pero manejables, conforma el corazón de la evaluación del riesgo, a través de la cual y utilizando el mejor conocimiento y entendimiento actual que se tenga disponible, se persigue reducir la incertidumbre y cuantificar la incertidumbre restante mediante predicciones probabilísticas.

- Riesgo específico: Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como función de la amenaza y de la vulnerabilidad.
- Elementos en riesgo: Se refiere a la población, edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.

- Riesgo total: Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, estimándose como el producto del riesgo específico (R_s), y los elementos en riesgo (E).

Lo que implica que desde el punto de vista de la evaluación del riesgo, éste puede ser estimada a través de la siguiente expresión:

$$R_t = H.E.V \quad (11.1)$$

Donde: H es la amenaza (peligro) en términos de probabilidad de ocurrencia de un determinado fenómeno, E son los elementos bajo riesgo (que también se puede ver como el valor de los bienes expuestos) y V es la vulnerabilidad, siendo el objetivo último que se persigue, la evaluación de las amenazas (representada en el caso de estudio por el paso cercano a un sitio de fenómenos meteorológicos como depresiones y tormentas tropicales y huracanes), desarrollándose dicha evaluación mediante análisis de intensidad, frecuencia y lugar en que ocurren, a partir de análisis tales como:

- Histórico: Que permite estimar la magnitud del evento y períodos de retorno asociados.
- Estadístico: A través del cual se analiza la ocurrencia de los eventos naturales generadores de amenazas, en base a los datos existentes.
- Determinístico: Donde se simulan los distintos eventos mediante modelos matemáticos específicos.
- Heurístico (experto): Grupos de especialistas determinan la susceptibilidad del o de los elementos considerados ante una amenaza en particular, y basados en sus conocimientos y experiencia, determinan criterios y su ponderación.

En este trabajo se desarrollaron los dos (2) primeros tipos de análisis a los fines de caracterizar lo más fidedignamente posible la amenaza representada por el paso de fenómenos meteorológicos (depresiones y tormentas tropicales así como huracanes) sobre el litoral costero de Venezuela, para posteriormente hacer la evaluación de los riesgos asociados, y en base a ésta poder tomar las decisiones necesarias para minimizar los costos y consecuencias asociados.

11.1.1 Estimación del peligro y del riesgo asociado a la presencia y acción de ciclones tropicales. Escala de Saffir-Simpson.

La escala de Saffir-Simpson clasifica los ciclones tropicales según la intensidad del viento, y fue desarrollada en 1969 por el ingeniero Herbert Saffir y el director del Centro de Huracanes de los Estados Unidos, Bob Simpson (ver Tabla 11-1).

La escala caracteriza a los fenómenos meteorológicos en Depresiones Tropicales, Tormentas Tropicales, y Huracanes Grado 1, Grado 2, Grado 3, Grado 4 y Grado 5 en función de la velocidad de los vientos y de la presión atmosférica.

Se acostumbra a denominar a los huracanes grado 1 y grado 2 como “Huracanes Menores”, mientras que a los huracanes grado 3, grado 4 y grado 5 se les denomina “Huracanes Mayores”.

Tabla 11-1. Escala de Saffir-Simpson.

CATEGORÍA DEL FENÓMENO	PRESIÓN CENTRAL (mb)	VIENTOS (NUDOS)	VIENTOS (km/h)	MAREA DE TORMENTA (m)	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS POSIBLES DAÑOS MATERIALES E INUNDACIONES
Perturbación Tropical	1008.1 a 1010.0		-----	-----	Ligera circulación de vientos.
Depresión Tropical	1004.1 a 1008.0	< 34	< 62	-----	Localmente destructivo.
Tormenta Tropical	985.1 a 1004	34 a 63	62.1 a 118.0	1.1	Tiene efectos destructivos.
Huracán de Grado o categoría 1	980.1 a 985.0	64 a 82	118.1 a 154.0	1.5	Potencial mínimo. Ningún daño efectivo en edificios. Daños concentrados principalmente en casas rodantes no ancladas, arbustos, follaje y árboles. Ciertos daños a señales pobremente construidas. Algunas inundaciones de carreteras costeras en sus zonas más bajas y daños leves a las estructuras de los muelles. Ciertas embarcaciones pequeñas pueden ser arrancadas de sus amarres en fondeaderos que estén expuestos.
Huracán de Grado o categoría 2	965.1 a 980.0	83 a 95	154.1 a 178.0	2.0 a 2.5	Potencial moderado. Daños de consideración a arbustos y follaje de árboles, inclusive con derribamientos. Daño extenso a señales pobremente construidas. Ciertos daños en techos, puertas y ventanas de las casas. Carreteras costeras inundadas de 2 a 4 horas antes de la entrada del centro del huracán. Daños graves a casas rodantes. Daño considerable a muelles e inundación de marinas. Las pequeñas embarcaciones en fondeaderos sin protección rompen amarres. Evacuación de residentes que viven en la línea de costa.
Huracán Grado o categoría 3	945.1 a 965.0	96 a 113	178.1 a 210.0	2.5 a 4.0	Potencial extensivo. Follaje arrancado de los árboles y derribamiento de árboles altos. Destrucción de casi todas las señales pobremente construidas. Ciertos daños en techos, puertas y ventanas de las casas con leves daños estructurales en residencias pequeñas. Destrucción de casas rodantes. Los escombros flotantes y el embate de las olas dañan a las estructuras mayores cercanas a la costa. Los terrenos planos sobre 1,5 m del nivel del mar, pueden resultar inundados hasta 13 km tierra adentro (o más) desde la costa.
Huracán Grado o categoría 4	920.1 a 945.0	114 a 135	210.1 a 250.0	4.0 a 5.5	Potencial extremo. Arbustos y árboles derribados, todas las señales destruidas. Daños extensos en techos, puertas y ventanas de las casas. Falla total de techos en residencias pequeñas. Destrucción completa de casas móviles. Terrenos de planicie a 3 m sobre el nivel del mar, pueden inundarse hasta 10 km tierra adentro de la costa. Grave daño a la planta baja de estructuras cercanas a la costa debido a la inundación, el embate de las olas y escombros flotantes. Erosión importante de la franja costera.
Huracán Grado o categoría 5	< 920	> 135	> 250	> 5.5	Potencial catastrófico. Derribamiento de arbustos y árboles con caída total de señales. Daño muy severo y extenso puertas y en ventanas con rotura extendida de vidrios. Colapso generalizado de techos en muchas residencias y edificios industriales, algunos de ellos con falla total. Pequeñas edificaciones derribadas o volcadas con destrucción completa de casas móviles. Daños graves en plantas bajas de todas las estructuras situadas a menos de 4,6 m por encima del nivel del mar y a una distancia de hasta 460 m de la costa.

Fuente: <http://weather.unisys.com/hurricane/index.php> y modificada por el autor.

11.2 DATOS RELEVANTES DE LAS TEMPORADAS DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO, OBTENIDOS A PARTIR DE LA BASE DE DATOS HURDAT (LAPSO: 1851-2016).

Año	Número total de eventos	Fecha de inicio del primer evento	Fecha de inicio del último evento	Depresión Tropical	Tormenta Tropical	Hur. G-1	Hur. G-2	Hur. G-3	Hur. G-4	Hur. G-5	Total de eventos anual	Total de huracanes anual	Total de huracanes mayores anual
1851	6	25-Jun	16-Oct	0	3	2	0	1	0	0	6	3	1
1852	5	19-Ago	06-Oct	0	0	3	1	1	0	0	5	5	1
1853	8	05-Ago	19-Oct	0	4	1	1	1	1	0	8	4	2
1854	5	25-Jun	20-Oct	0	2	1	1	1	0	0	5	3	1
1855	5	06-Ago	15-Sep	0	1	1	2	1	0	0	5	4	1
1856	6	09-Ago	18-Sep	0	2	2	0	1	1	0	6	4	2
1857	4	30-Jun	24-Sep	0	1	1	2	0	0	0	4	3	0
1858	6	12-Jun	21-Oct	0	0	4	2	0	0	0	6	6	0
1859	8	01-Jul	28-Oct	0	1	2	4	1	0	0	8	7	1
1860	7	08-Ago	20-Oct	0	1	1	4	1	0	0	7	6	1
1861	8	06-Jul	01-Nov	0	2	4	2	0	0	0	8	6	0
1862	6	15-Jun	22-Nov	0	3	1	2	0	0	0	6	3	0
1863	9	08-Ago	29-Sep	0	4	1	4	0	0	0	9	5	0
1864	5	16-Jul	22-Oct	0	2	3	0	0	0	0	5	3	0
1865	7	30-May	18-Oct	0	4	1	2	0	0	0	7	3	0
1866	7	11-Jul	28-Oct	0	0	3	3	0	1	0	7	7	1
1867	9	21-Jun	27-Oct	0	2	2	4	1	0	0	9	7	1
1868	4	03-Sep	15-Oct	0	1	0	3	0	0	0	4	3	0
1869	10	12-Ago	04-Oct	0	3	2	4	1	0	0	10	7	1
1870	11	30-Jul	30-Oct	0	1	5	3	2	0	0	11	10	2
1871	8	01-Jun	10-Oct	0	2	3	1	2	0	0	8	6	2
1872	5	09-Jul	22-Oct	0	1	3	1	0	0	0	5	4	0
1873	5	01-Jun	26-Sep	0	2	1	0	2	0	0	5	3	2
1874	7	02-Jul	31-Oct	0	3	3	1	0	0	0	7	4	0
1875	6	16-Ago	12-Oct	0	1	3	1	1	0	0	6	5	1
1876	5	09-Sep	12-Oct	0	1	1	1	2	0	0	5	4	2
1877	8	01-Ago	28-Nov	0	5	2	0	1	0	0	8	3	1
1878	12	01-Jul	25-Nov	0	2	4	4	1	1	0	12	10	2
1879	8	09-Ago	18-Nov	0	2	2	2	2	0	0	8	6	2
1880	11	21-Jun	20-Oct	0	2	6	1	0	2	0	11	9	2
1881	7	01-Ago	18-Sep	0	3	2	2	0	0	0	7	4	0
1882	6	24-Ago	05-Oct	0	1	2	1	1	1	0	6	5	2
1883	4	18-Ago	22-Oct	0	1	1	0	2	0	0	4	3	2
1884	4	01-Sep	07-Oct	0	0	2	1	1	0	0	4	4	1
1885	8	07-Ago	10-Oct	0	2	5	0	1	0	0	8	6	1
1886	12	13-Jun	21-Oct	0	2	1	5	3	1	0	12	10	4
1887	19	15-May	07-Dic	0	8	5	4	2	0	0	19	11	2
1888	9	16-Jun	17-Nov	0	3	2	2	2	0	0	9	6	2
1889	9	16-May	05-Oct	0	3	4	2	0	0	0	9	6	0
1890	4	27-May	31-Oct	0	2	1	0	1	0	0	4	2	1
1891	10	03-Jul	03-Nov	0	3	3	3	1	0	0	10	7	1
1892	9	09-Jun	21-Oct	0	4	2	3	0	0	0	9	5	0
1893	12	12-Jun	05-Nov	0	2	1	4	4	1	0	12	10	5
1894	7	06-Jun	21-Oct	0	2	0	1	3	1	0	7	5	4
1895	6	14-Ago	13-Oct	0	4	0	2	0	0	0	6	2	0
1896	7	04-Jul	27-Nov	0	1	0	4	2	0	0	7	6	2
1897	6	31-Ago	23-Oct	0	3	2	1	0	0	0	6	3	0
1898	11	02-Ago	27-Oct	0	6	3	1	0	1	0	11	5	1
1899	10	26-Jun	07-Nov	0	5	0	3	1	1	0	10	5	2
1900	7	27-Ago	24-Oct	0	4	0	1	1	1	0	7	3	2
1901	13	11-Jun	30-Oct	0	7	5	1	0	0	0	13	6	0
1902	5	12-Jun	01-Nov	0	2	1	2	0	0	0	5	3	0
1903	10	21-Jul	17-Nov	0	3	3	3	1	0	0	10	7	1
1904	6	10-Jun	31-Oct	0	2	4	0	0	0	0	6	4	0
1905	5	06-Sep	05-Nov	0	4	0	0	1	0	0	5	1	1
1906	11	08-Jun	05-Nov	0	5	2	1	2	1	0	11	6	3
1907	5	24-Jun	06-Nov	0	5	0	0	0	0	0	5	0	0
1908	10	06-Mar	19-Oct	0	4	2	3	1	0	0	10	6	1
1909	12	15-Jun	08-Nov	0	6	0	2	4	0	0	12	6	4
1910	5	23-Ago	09-Oct	0	2	0	2	0	1	0	5	3	1
1911	6	04-Ago	26-Oct	0	3	1	2	0	0	0	6	3	0
1912	7	07-Jun	11-Nov	0	3	2	1	1	0	0	7	4	1
1913	6	21-Jun	28-Oct	0	2	4	0	0	0	0	6	4	0
1914	1	15-Sep	15-Sep	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1915	6	31-Jul	21-Sep	0	1	1	1	1	2	0	6	5	3
1916	15	13-May	11-Nov	0	5	2	3	4	1	0	15	10	5
1917	4	06-Jul	20-Sep	0	2	0	0	1	1	0	4	2	2
1918	6	01-Ago	09-Sep	0	2	1	2	1	0	0	6	4	1
1919	5	02-Jul	10-Nov	0	3	0	1	0	1	0	5	2	1
1920	5	07-Sep	25-Sep	0	1	2	2	0	0	0	5	4	0
1921	7	16-Jun	19-Nov	0	2	3	0	1	1	0	7	5	2
1922	5	12-Jun	12-Oct	0	2	1	1	1	0	0	5	3	1
1923	9	22-Jun	24-Oct	0	5	2	1	1	0	0	9	4	1
1924	11	18-Jun	05-Nov	0	6	2	1	1	0	1	11	5	2
1925	4	18-Ago	27-Nov	0	2	2	0	0	0	0	4	2	0
1926	11	22-Jul	12-Nov	0	3	0	2	2	4	0	11	8	6
1927	8	18-Ago	19-Nov	0	4	2	1	1	0	0	8	4	1
1928	6	03-Ago	10-Oct	0	2	2	1	0	0	1	6	4	1
1929	5	27-Jun	19-Oct	0	2	2	0	0	1	0	5	3	1
1930	3	21-Ago	18-Oct	0	1	0	0	1	1	0	3	2	2
1931	13	25-Jun	22-Nov	0	10	1	1	0	1	0	13	3	1
1932	15	05-May	03-Nov	0	9	1	1	0	2	2	15	6	4
1933	20	14-May	15-Nov	0	9	3	2	1	3	2	20	11	6

Año	Número total de eventos	Fecha de inicio del primer evento	Fecha de inicio del último evento	Depresión Tropical	Tormenta Tropical	Hur. G-1	Hur. G-2	Hur. G-3	Hur. G-4	Hur. G-5	Total de eventos anual	Total de huracanes anual	Total de huracanes mayores anual
1934	13	27-May	20-Nov	0	6	3	3	1	0	0	13	7	1
1935	8	18-Ago	30-Oct	0	3	1	1	0	2	1	8	5	3
1936	17	12-Jun	02-Dic	0	10	3	3	1	0	0	17	7	1
1937	11	29-Jul	18-Oct	0	7	1	2	1	0	0	11	4	1
1938	9	01-Ene	07-Nov	0	6	0	1	1	0	1	9	3	2
1939	6	12-Jun	28-Oct	0	3	2	0	0	1	0	6	3	1
1940	9	19-May	24-Oct	0	3	3	3	0	0	0	9	6	0
1941	6	11-Sep	15-Oct	0	2	2	0	2	0	0	6	4	2
1942	11	03-Ago	05-Nov	0	7	1	2	1	0	0	11	4	1
1943	10	25-Jul	20-Oct	0	5	1	2	1	1	0	10	5	2
1944	14	13-Jul	12-Oct	0	6	4	1	1	2	0	14	8	3
1945	11	20-Jun	10-Oct	0	6	0	2	1	2	0	11	5	3
1946	6	13-Jun	31-Oct	0	3	1	1	0	1	0	6	3	1
1947	9	31-Jul	16-Oct	0	4	2	1	1	0	1	9	5	2
1948	9	22-May	08-Nov	0	3	2	0	2	2	0	9	6	4
1949	13	21-Ago	03-Nov	0	6	1	3	1	2	0	13	7	3
1950	13	12-Ago	18-Oct	2	0	1	2	5	2	1	13	11	8
1951	10	15-May	15-Oct	0	2	2	1	3	1	1	10	8	5
1952	7	02-Feb	20-Oct	0	1	1	2	2	1	0	7	6	3
1953	14	25-May	07-Dic	0	8	1	1	3	1	0	14	6	4
1954	11	24-Jun	30-Dic	0	4	2	3	1	1	0	11	7	2
1955	12	31-Jul	14-Oct	0	3	1	2	4	1	1	12	9	6
1956	8	12-Jun	30-Oct	0	4	2	0	1	1	0	8	4	2
1957	8	08-Jun	23-Oct	0	5	1	0	0	2	0	8	3	2
1958	10	14-Jun	05-Oct	0	3	2	0	2	2	1	10	7	5
1959	11	28-May	17-Oct	0	4	5	0	1	1	0	11	7	2
1960	7	22-Jun	17-Sep	0	3	1	1	0	0	2	7	4	2
1961	11	20-Jul	05-Nov	0	3	1	0	3	2	2	11	8	7
1962	5	26-Ago	14-Oct	0	2	0	2	1	0	0	5	3	1
1963	9	31-Jul	25-Oct	0	2	2	3	1	1	0	9	7	2
1964	12	02-Jun	05-Nov	0	6	0	0	2	4	0	12	6	6
1965	6	11-Jun	12-Oct	0	2	2	1	0	1	0	6	4	1
1966	11	04-Jun	04-Nov	0	4	4	0	2	1	0	11	7	3
1967	26	28-Ago	26-Oct	18	2	4	1	0	0	1	26	6	1
1968	15	01-Jun	24-Nov	7	4	4	0	0	0	0	15	4	0
1969	29	29-May	21-Nov	11	6	5	2	4	0	1	29	12	5
1970	19	17-May	20-Oct	9	5	2	1	2	0	0	19	5	2
1971	22	04-Jul	12-Nov	9	7	4	1	0	0	1	22	6	1
1972	19	23-May	01-Nov	14	2	2	1	0	0	0	19	3	0
1973	17	01-Jul	16-Oct	9	4	3	0	1	0	0	17	4	1
1974	20	24-Jun	04-Oct	9	7	1	1	1	1	0	20	4	2
1975	23	27-Jun	09-Dic	14	3	1	2	2	1	0	23	6	3
1976	21	21-May	22-Oct	11	4	2	2	2	0	0	21	6	2
1977	15	13-Jun	24-Oct	9	1	4	0	0	0	1	15	5	1
1978	24	18-Ene	03-Nov	12	7	2	1	0	2	0	24	5	2
1979	20	11-Jun	07-Nov	11	4	2	1	0	1	1	20	5	2
1980	18	31-Jul	25-Nov	7	2	4	3	1	0	1	18	9	2
1981	22	06-May	12-Nov	10	5	3	1	2	1	0	22	7	3
1982	8	02-Jun	30-Sep	2	4	1	0	0	1	0	8	2	1
1983	6	23-Jul	26-Sep	2	1	2	0	1	0	0	6	3	1
1984	20	11-Jun	12-Dic	7	8	3	1	0	1	0	20	5	1
1985	14	15-Jul	07-Dic	3	4	4	0	2	1	0	14	7	3
1986	10	05-Jun	18-Nov	4	2	3	1	0	0	0	10	4	0
1987	14	09-Ago	09-Oct	7	4	2	0	1	0	0	14	3	1
1988	19	05-Ago	17-Nov	7	7	2	0	0	2	1	19	5	3
1989	15	24-Jun	28-Nov	4	4	3	2	0	1	1	15	7	2
1990	16	24-May	16-Oct	2	6	5	2	1	0	0	16	8	1
1991	12	29-Jun	28-Oct	4	4	1	1	1	1	0	12	4	2
1992	10	21-Abr	22-Oct	3	3	1	2	0	0	1	10	4	1
1993	10	18-Jun	29-Sep	2	4	2	1	1	0	0	10	4	1
1994	12	30-Jun	08-Nov	5	4	2	1	0	0	0	12	3	0
1995	21	03-Jun	27-Oct	2	8	4	2	2	3	0	21	11	5
1996	13	17-Jun	13-Nov	0	4	3	0	4	2	0	13	9	6
1997	9	31-May	14-Oct	1	5	2	0	1	0	0	9	3	1
1998	14	27-Jul	24-Nov	0	4	3	4	1	1	1	14	10	3
1999	16	11-Jun	13-Nov	4	4	0	3	0	5	0	16	8	5
2000	19	07-Jun	25-Oct	4	7	4	1	1	2	0	19	8	3
2001	17	05-Jun	23-Nov	2	6	4	1	2	2	0	17	9	4
2002	14	14-Jul	14-Oct	2	8	1	1	1	1	0	14	4	2
2003	21	18-Abr	07-Dic	5	9	3	1	1	1	1	21	7	3
2004	16	31-Jul	26-Nov	1	6	2	1	2	3	1	16	9	6
2005	31	08-Jun	30-Dic	2	14	7	1	2	1	4	31	15	7
2006	10	10-Jun	27-Sep	0	5	3	0	2	0	0	10	5	2
2007	17	06-May	10-Dic	2	9	4	0	0	0	2	17	6	2
2008	17	31-May	05-Nov	1	8	2	1	1	4	0	17	8	5
2009	11	10-Ago	04-Nov	2	6	0	1	1	1	0	11	3	2
2010	21	24-Jun	29-Oct	2	7	3	4	1	4	0	21	12	5
2011	19	29-Jun	08-Nov	1	12	2	1	1	2	0	19	6	3
2012	19	19-May	22-Oct	0	9	6	3	1	0	0	19	10	1
2013	14	05-Jun	18-Nov	1	11	2	0	0	0	0	14	2	0
2014	9	28-Jun	21-Oct	1	2	3	1	1	1	0	9	6	2
2015	12	08-May	09-Nov	1	7	2	0	1	1	0	12	4	2
2016	16	13-Ene	21-Nov	1	9	2	1	1	1	1	16	6	3

11.3 ALTERACIONES OCEÁNICAS Y ATMOSFÉRICAS ASOCIADAS A LA OCURRENCIA DEL FENÓMENO “ENOS” Y ESQUEMATIZACIÓN DEL FENÓMENO.

Tabla 11-2. Alteraciones oceánicas y atmosféricas generadas por el fenómeno ENOS en el Pacífico ecuatorial.

Manifestación (Efecto)	Ámbito geográfico afectado
Calentamiento de la temperatura superficial del mar.	Océano Pacífico ecuatorial central y costas occidentales de América entre 30° N y 30° S (Con mayor incidencia en el litoral Peruano)
Incremento de las precipitaciones, tormentas tropicales e inundaciones.	Océano Pacífico ecuatorial central e islas de este sector del Pacífico.
Presencia de aguas cálidas y aparición de especies animales típicas del ámbito tropical.	Costas de Sudamérica, especialmente de Perú.
Reducción en la concentración de nutrientes.	Océano Pacífico ecuatorial y costa de América entre 30° N y 30° S (Con mayor incidencia en el litoral Peruano).
Incremento de precipitaciones, inundaciones	Costa Norte de Perú y sur de Ecuador.
Sequías y disminución del número de tormentas y ciclones tropicales.	Indonesia, norte y este de Australia y Melanesia.
Incrementos de la temperatura del aire.	Costa oeste de Sudamérica entre 5° y 35° sur.
Disminución de la población de anchoveta y otras especies autóctonas.	Costa de Perú.
Reducción de precipitaciones.	Costa pacífica de América Central.
Reducción en la población de aves marinas.	Costas peruanas e islas del Pacífico ecuatorial.

Fuente: Valiente, 1999.

Tabla 11-3. Manifestaciones climáticas y ecológicas globales, relacionadas con la ocurrencia del ENOS.

Manifestación (Efecto)	Ámbito geográfico afectado
Sequía.	Altiplano del sur de Perú y noroeste de Bolivia.
Incremento de precipitaciones y mayor número de tormentas e inundaciones.	Sur de Estados Unidos (suroeste y sudeste) y norte de México (en especial el noroeste).
Descenso de precipitaciones, sequías y menor número de ciclones tropicales.	Mar Caribe.
Reducción de precipitaciones.	Amazonas brasileño.
Incremento de precipitaciones, aumento de tormentas y mayor entrada de sistemas frontales.	Litoral central de Chile.
Reducción de precipitaciones y eventuales sequías.	Noreste de Brasil.
Reducción de precipitaciones.	Venezuela y Colombia.
Incremento de la temperatura superficial del mar.	Altas latitudes del océano Pacífico oriental (Costa noroeste de Estados Unidos, Canadá y Alaska).
Reducción de fauna marina autóctona (peces y aves), y sustitución por especies de aguas cálidas.	Costa pacífica del nordeste de Estados Unidos y Canadá.
Crisis de la industria pesquera del salmón.	Costa pacífica del nordeste.
Reducción de precipitaciones invernales.	Islas Hawai.
Debilitamiento de la temporada de monzones, con eventuales sequías.	India y sudeste de Asia.
Incremento de precipitaciones.	Extremo sur de la India, Sri Lanka y océano Índico circundante.
Incremento de precipitaciones.	Sur de Brasil y norte de Argentina.
Aumento de temperaturas durante el invierno boreal.	Norte de Estados Unidos, sur de Canadá y Alaska.
Incremento de la temperatura superficial del mar.	Atlántico sud-ecuatorial, litoral de Guinea Meridional.
Fuerte sequía.	Sahel y Sahara occidentales.
Descenso de precipitaciones, sequía.	Extremo sudeste de África y Madagascar.
Reducción de precipitaciones.	Nordeste de China y sudeste de Mongolia.
Reducción de precipitaciones y sequía.	Meseta de Etiopía (extensible a Somalia y Yemen en casos de sequías severas).
Aumento de precipitaciones.	Extremo oriental de África ecuatorial (Kenia, Tanzania).
Incremento de precipitaciones.	Europa occidental (excepto mitad oeste de la Península Ibérica) e Islas Británicas.

Fuente: Valiente, 1999.

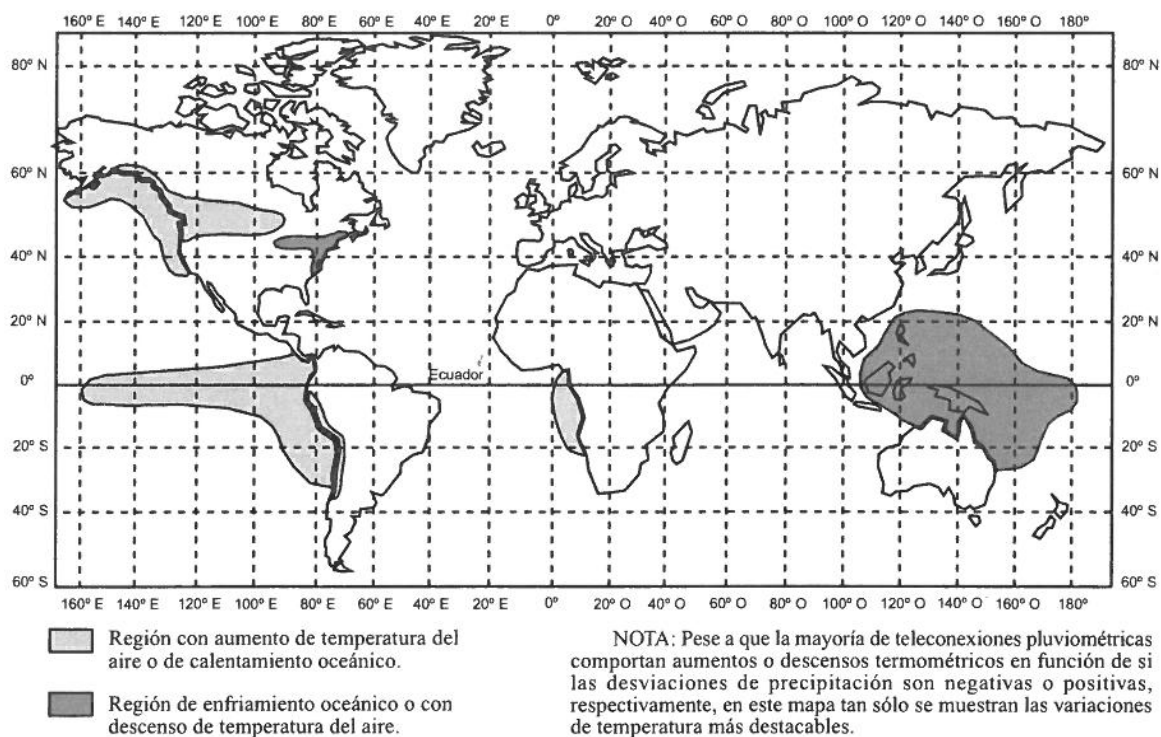


Figura 11-1. Distribución espacial de las principales teleconexiones termométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS.

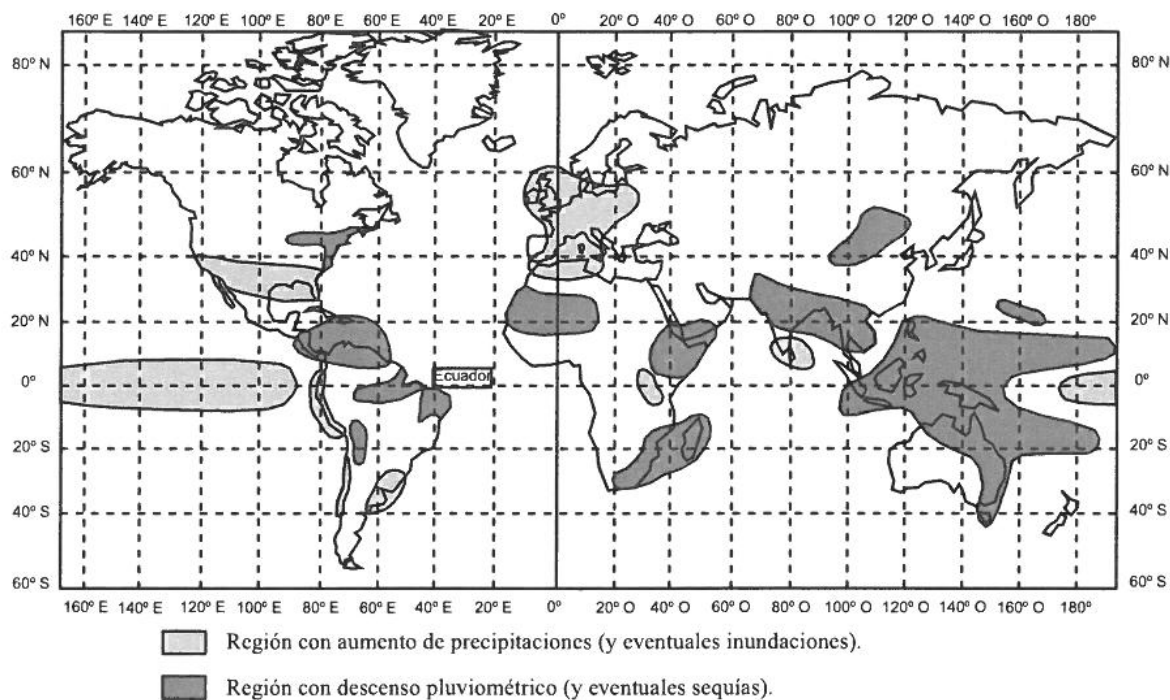


Figura 11-2. Distribución espacial de las principales teleconexiones pluviométricas globales asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS.

Fuente de ambas figuras: Valiente, 1999.

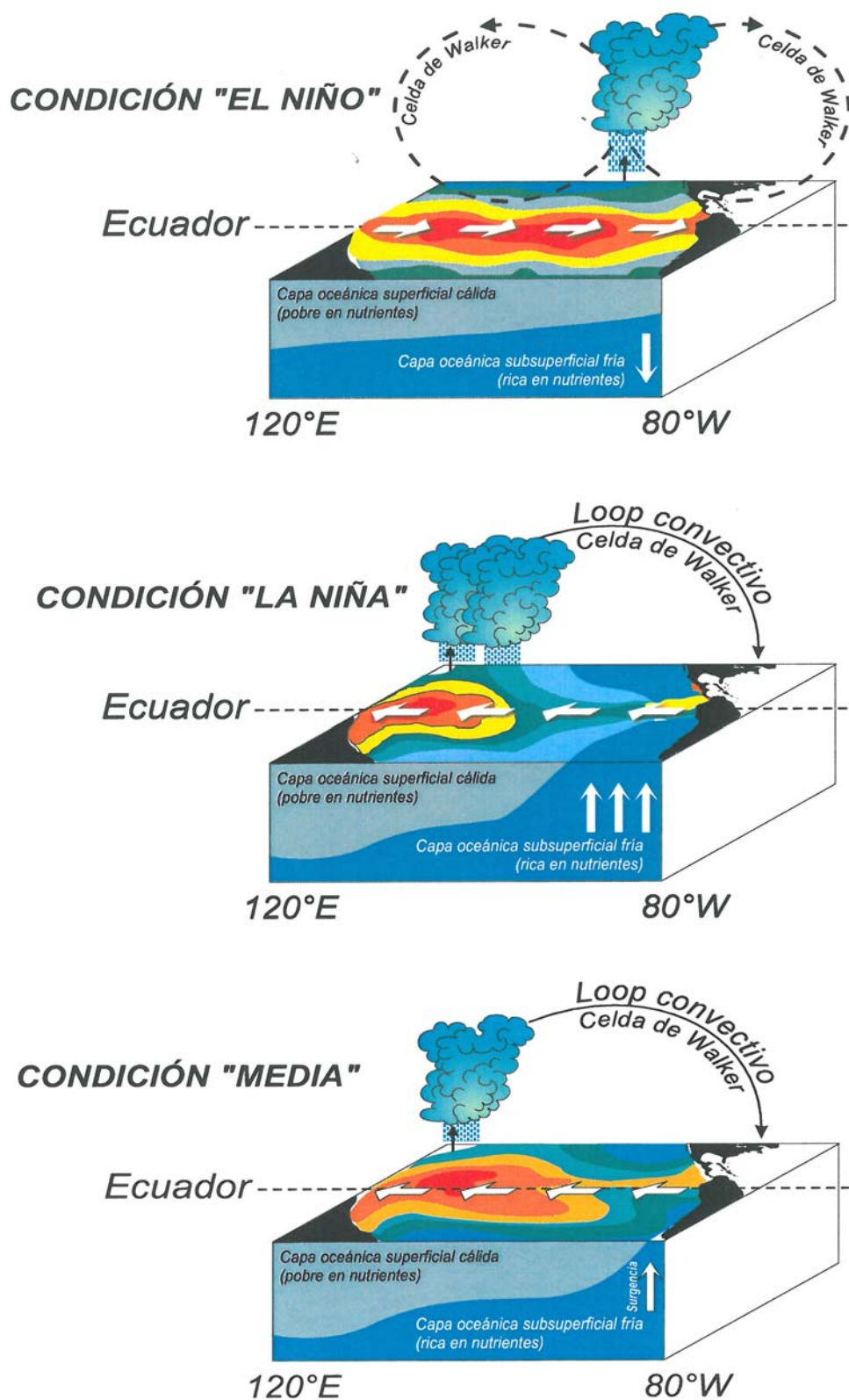


Figura 11-3. Modelo convectivo, de temperatura del mar y de surgencia, bajo condiciones de "El Niño", "La Niña" y condición neutra.

Fuente: Maturana et al, 2004.

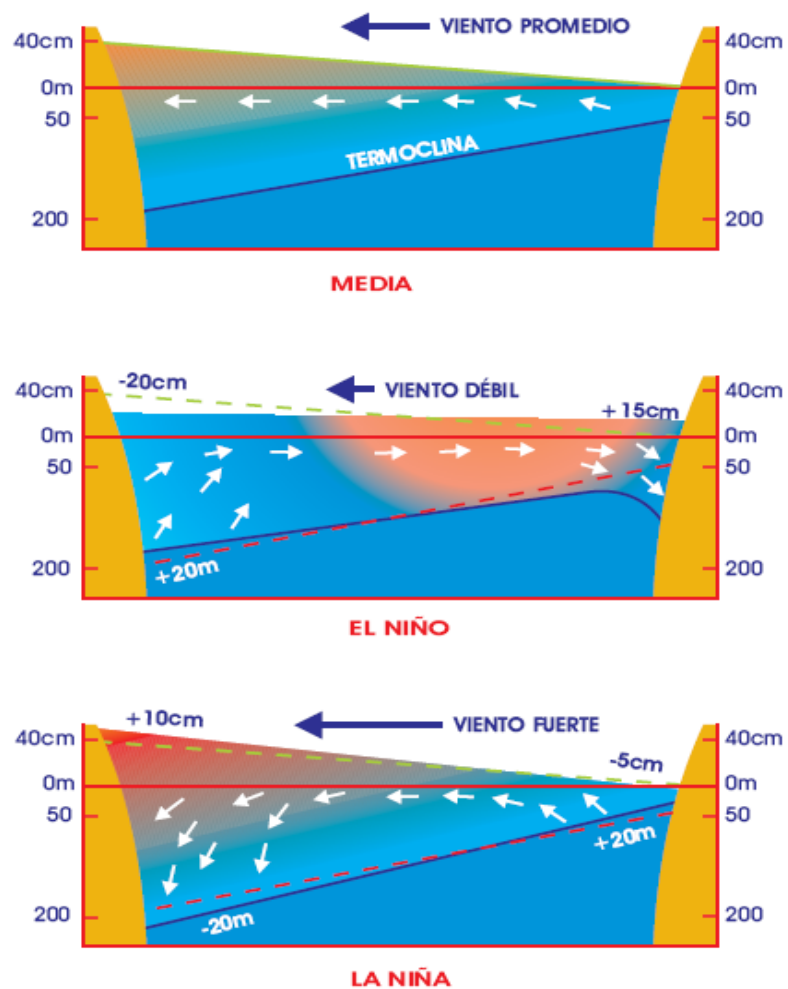


Figura 11-4. Esquema de las variaciones que ocurren en la profundidad de la termoclina y en el Nivel Medio del Mar, bajo condiciones Neutras, de El Niño y de La Niña.

Fuente: Maturana et al, 2004.

11.4 BASE DATOS DEL ÍNDICE ONI DE LA NOAA.

Año	Dic-Ene-Feb	Ene-Feb-Mar	Feb-Mar-Abr	Mar-Abr-May	Abr-May-Jun	May-Jun-Jul	Jun-Jul-Ago	Jul-Ago-Sep	Ago-Sep-Oct	Sep-Oct-Nov	Oct-Nov-Dic	Nov-Dic-Ene
1950	-1.5	-1.3	-1.2	-1.2	-1.1	-0.9	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8
1951	-0.8	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.0	0.8
1952	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1
1953	0.4	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
1954	0.8	0.5	0.0	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.8	-0.9	-0.8	-0.7	-0.7
1955	-0.7	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-1.1	-1.4	-1.7	-1.5
1956	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1957	-0.2	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.7
1958	1.8	1.7	1.3	0.9	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
1959	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0
1960	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1
1961	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
1963	-0.4	-0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.1	1.2	1.2	1.4	1.3
1964	1.1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.6	-0.3	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.2	1.5	1.9	2.0	2.0	1.7
1966	1.4	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4
1968	-0.6	-0.7	-0.6	-0.4	0.0	0.3	0.6	0.5	0.4	0.5	0.7	1.0
1969	1.1	1.1	0.9	0.8	0.6	0.4	0.4	0.5	0.8	0.9	0.8	0.6
1970	0.5	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.7	-0.9	-1.1
1971	-1.4	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0	-0.9
1972	-0.7	-0.4	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.4	1.6	1.8	2.1	2.1
1973	1.8	1.2	0.5	-0.1	-0.5	-0.9	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7	-1.9	-2.0
1974	-1.8	-1.6	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.6
1975	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.4	-1.6	-1.7
1976	-1.6	-1.2	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.8
1977	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.0
1979	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0
1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1
1982	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2.0	2.2	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	0.8	-1.1	-1.3	1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.1	-0.1				

Descripción: Episodios calientes (rojo) y fríos (azul), basados en un umbral de $\pm 0.5^\circ$ para el índice Oceánico El Niño (ONI). (calculado mediante la media móvil de 3 meses de las anomalías de la TSM en ERSST.v3b en la región Niño 3.4 ($5^\circ \text{ N} - 5^\circ \text{ S}$, $120^\circ \text{ W} - 170^\circ \text{ W}$) sobre periodos base de 30 años, actualizados cada 5 años. Para fines históricos, episodios fríos y calientes (números de color azul y rojo), se definen cuando el umbral es sobrepasado durante un mínimo de 5 meses consecutivos.

Nota: Datos actualizados de la página web el 11/10/2017.

11.5 MAPAS CARACTERIZADORES DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS.

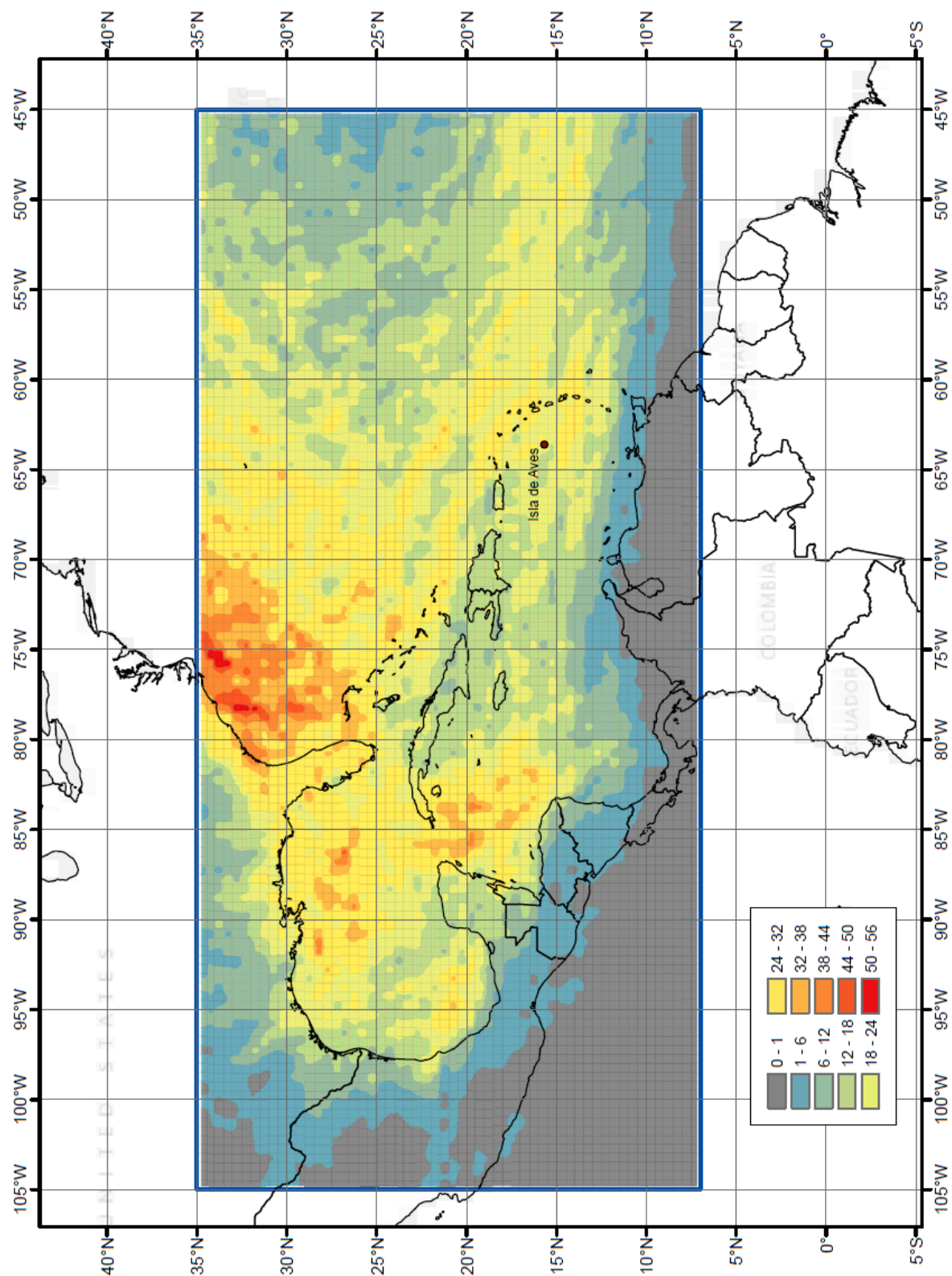


Figura 11-5. Distribución del número de depresiones y tormentas tropicales y de huracanes en la cuenca Atlántica. Lapso: 1851-2016.

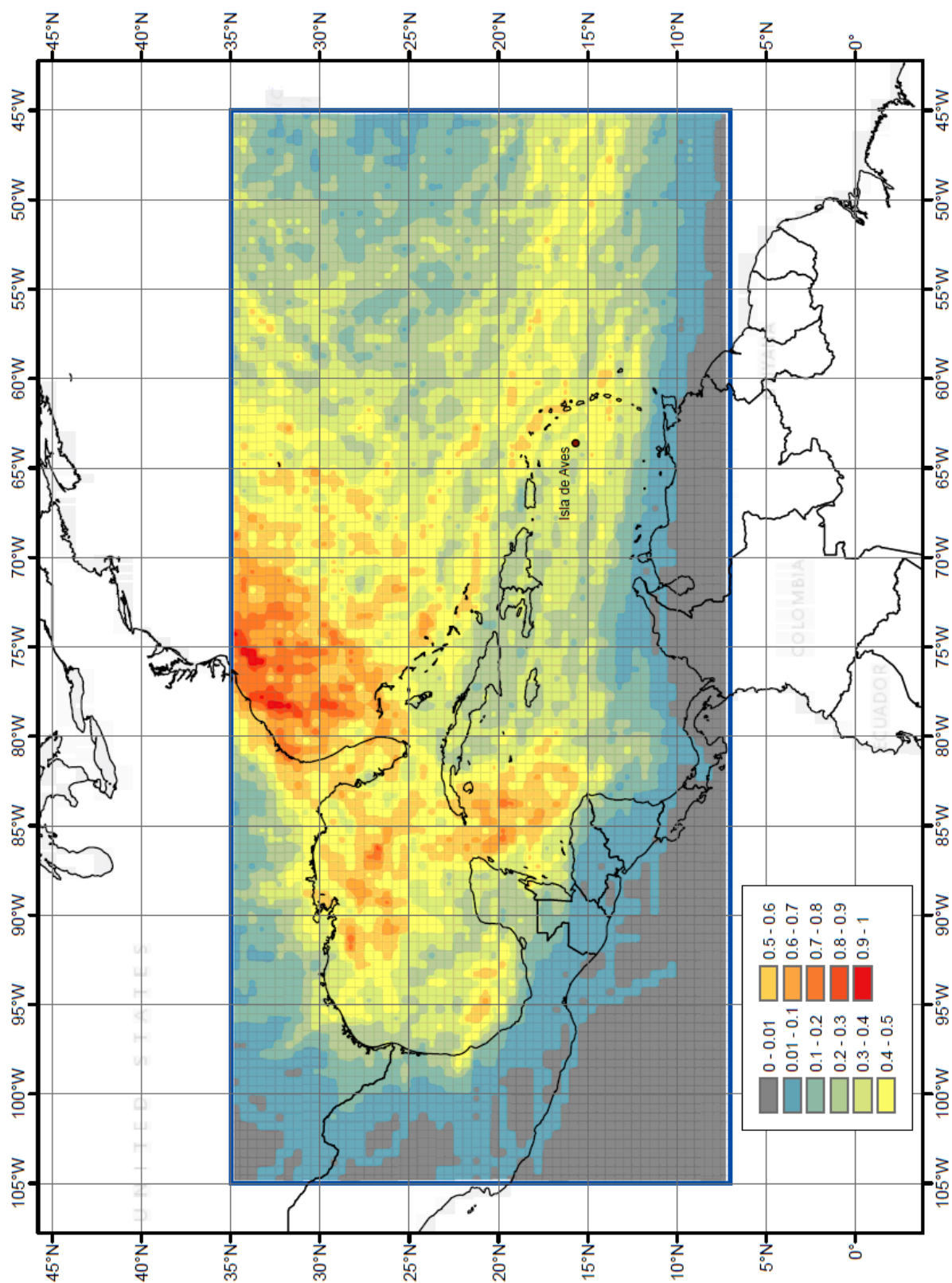


Figura 11-6. Frecuencia relativa del número de depresiones y tormentas tropicales y de huracanes en la cuenca Atlántica. Lapso: 1851-2016 (fracción del máximo que se localiza en las coordenadas: Lat. 33,75° N : Long. 75,75° O con 55 sistemas).

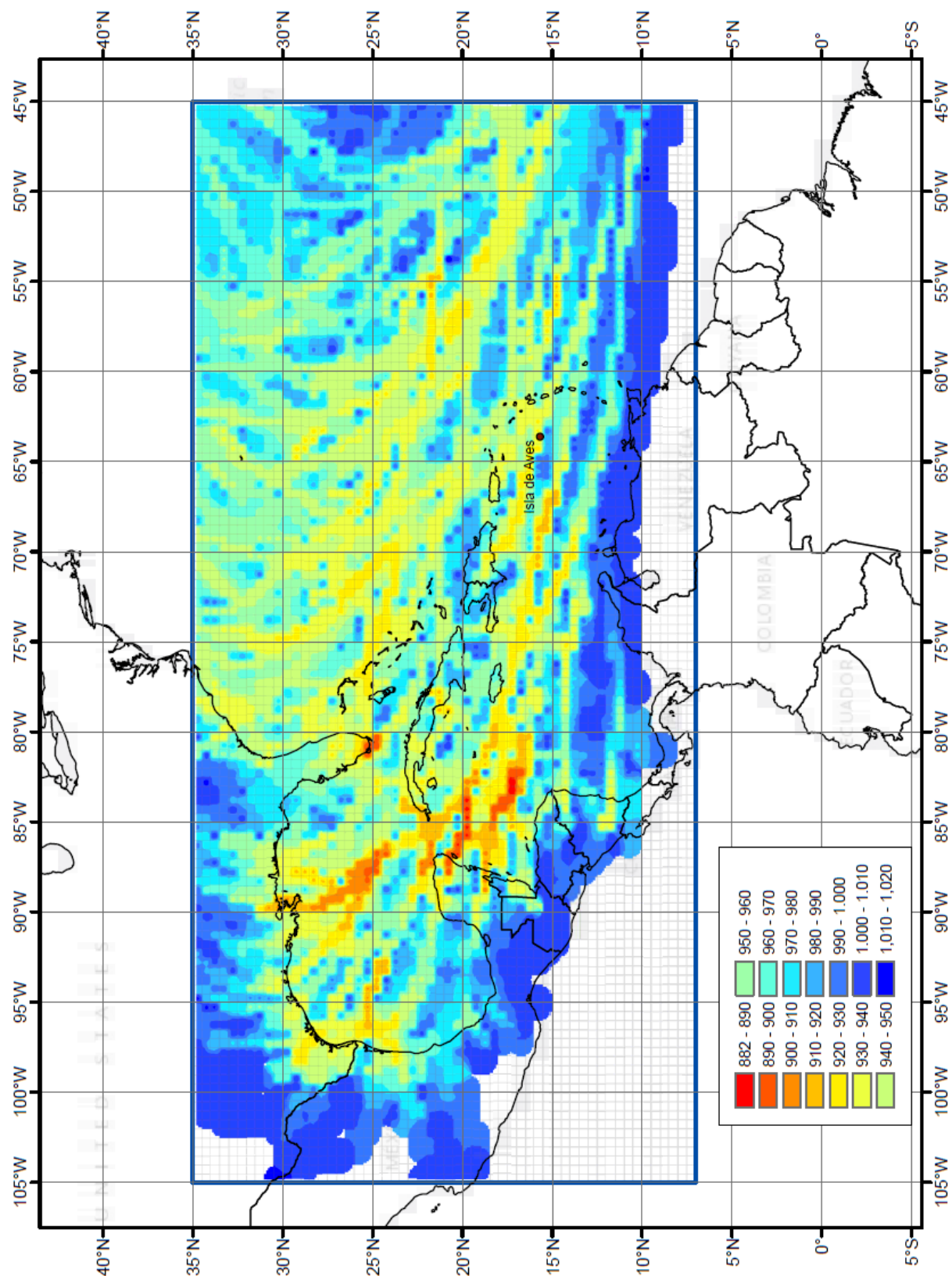


Figura 11-7. Presiones centrales mínimas (milibares) de cada fenómeno meteorológico a su paso por el dominio de estudio. Lapso: 1851-2016.

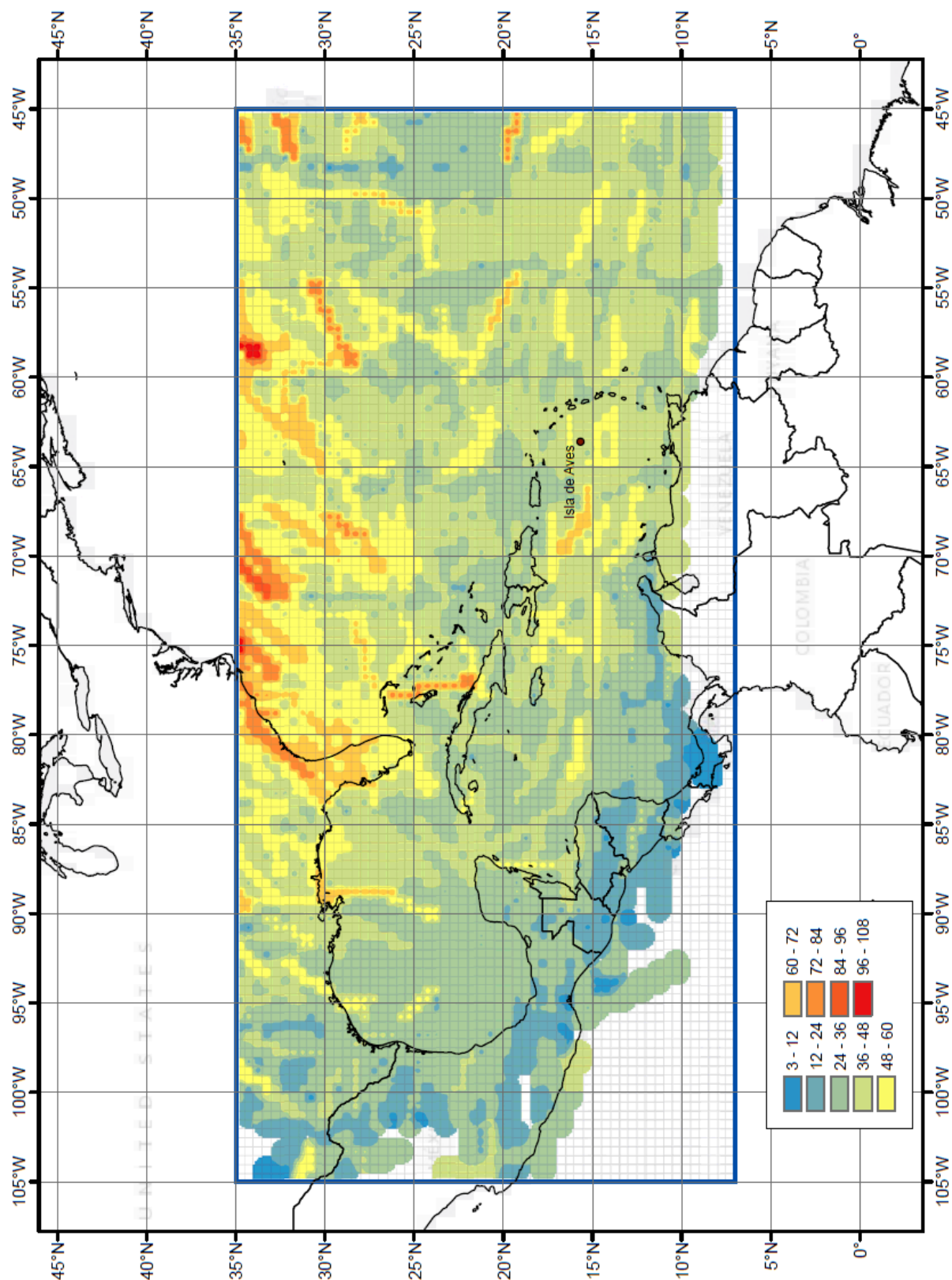


Figura 11-8. Velocidades máximas de traslación (en km/h) de cada uno de los fenómenos meteorológicos que han ocurrido en el lapso 1851-2016.

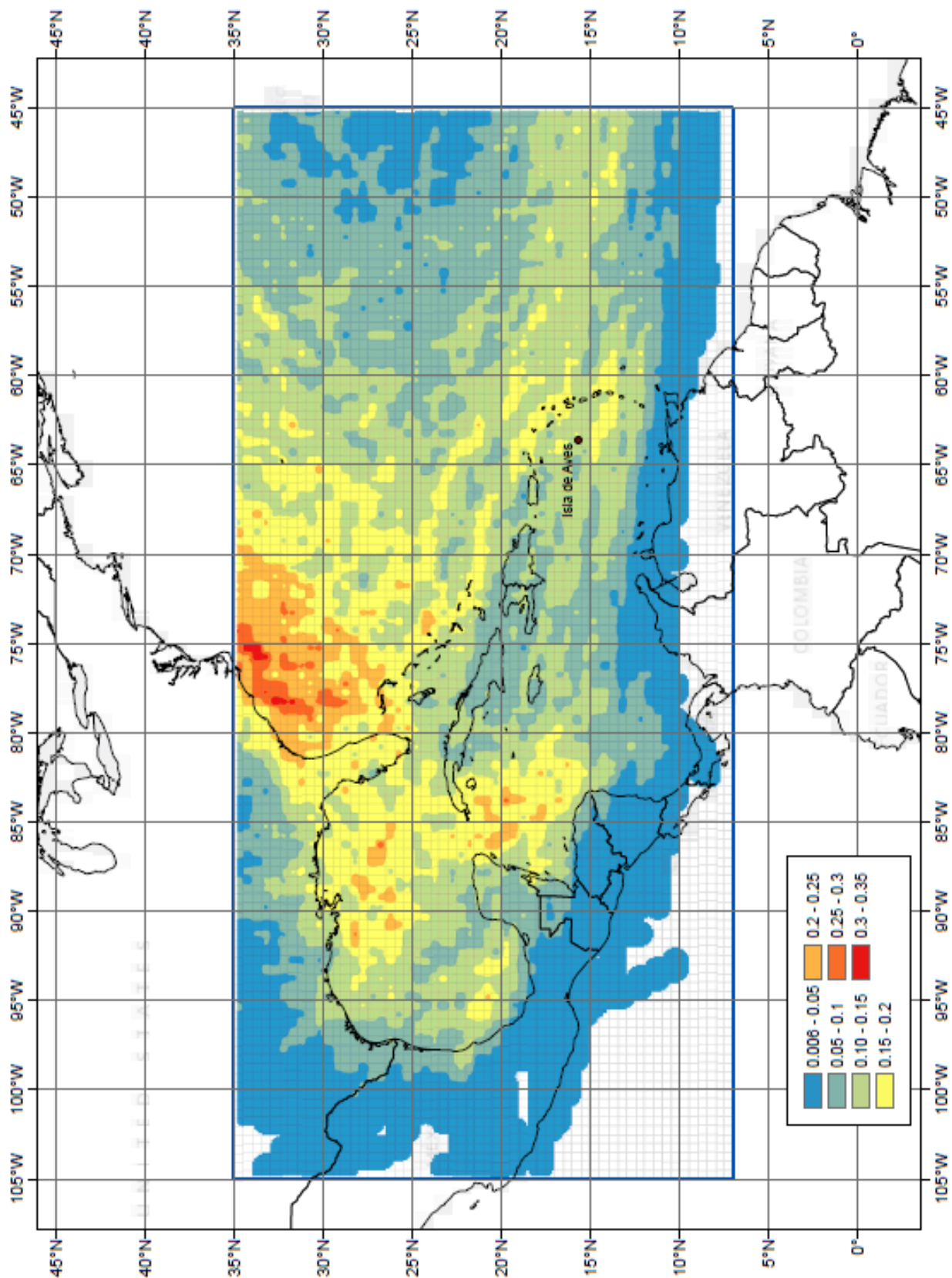


Figura 11-9. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales. Lapso: 1851-2016.

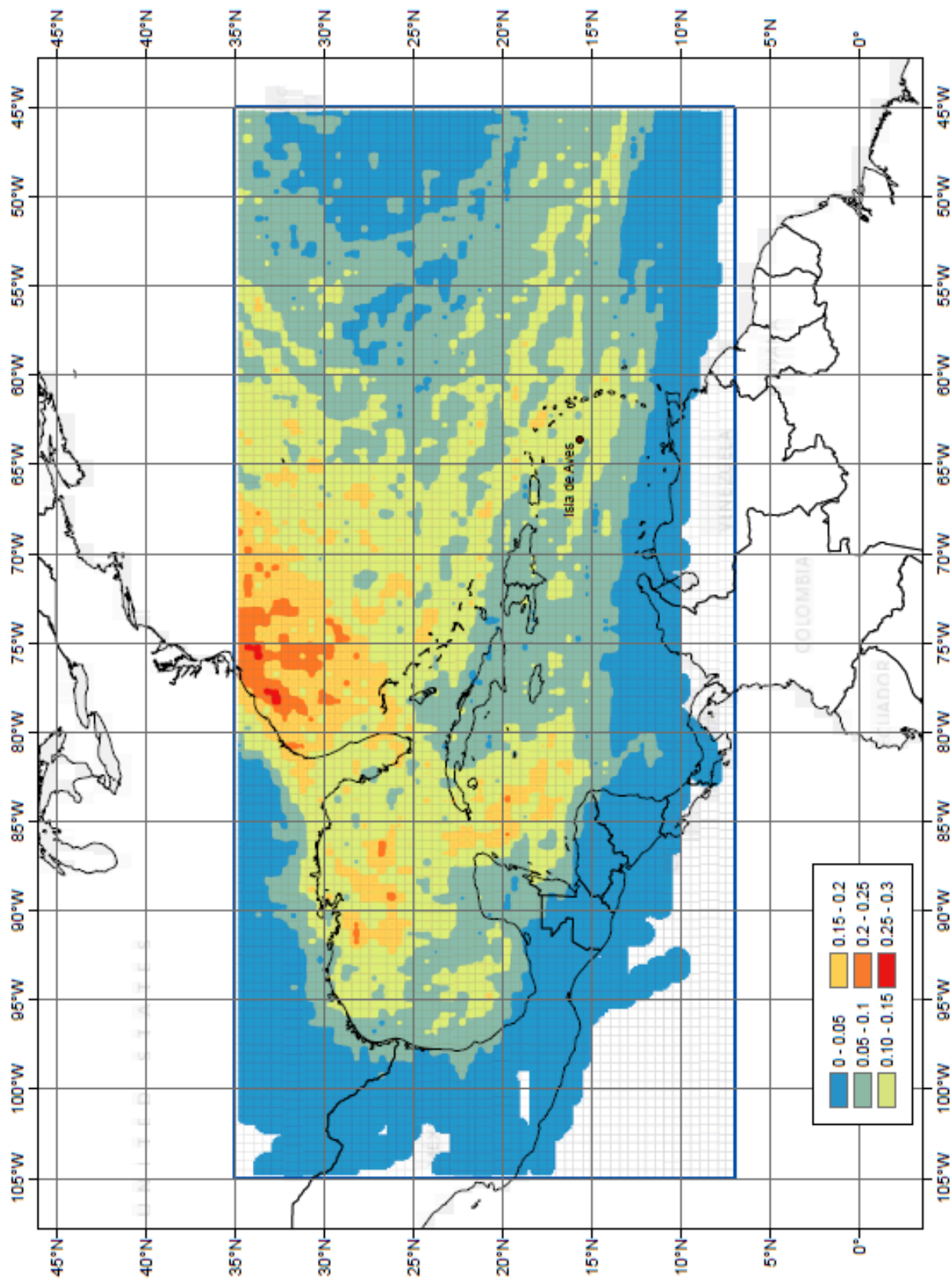


Figura 11-10. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales. Lapso: 1851-2016.

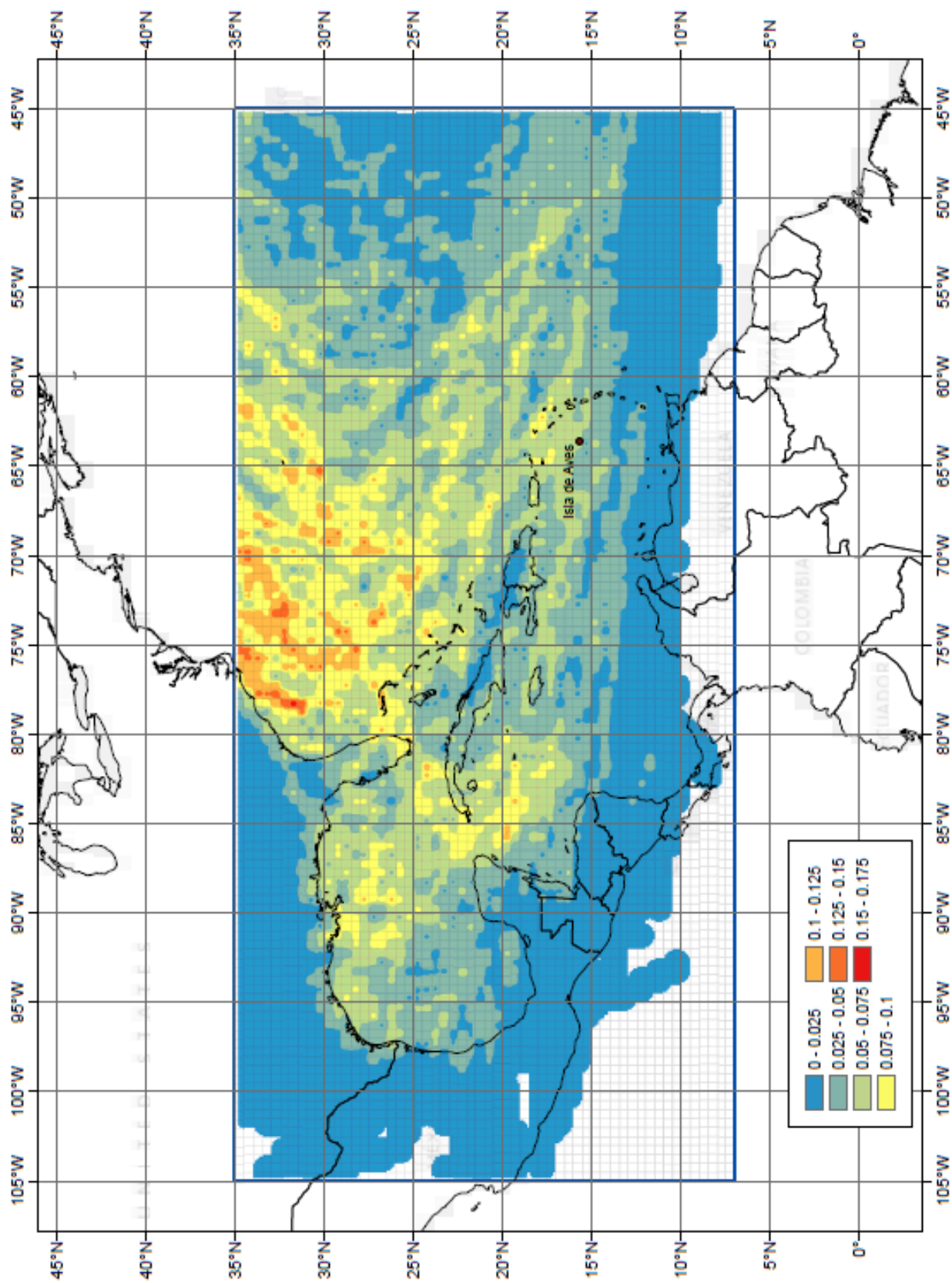


Figura 11-11. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1. Lapso: 1851-2016.

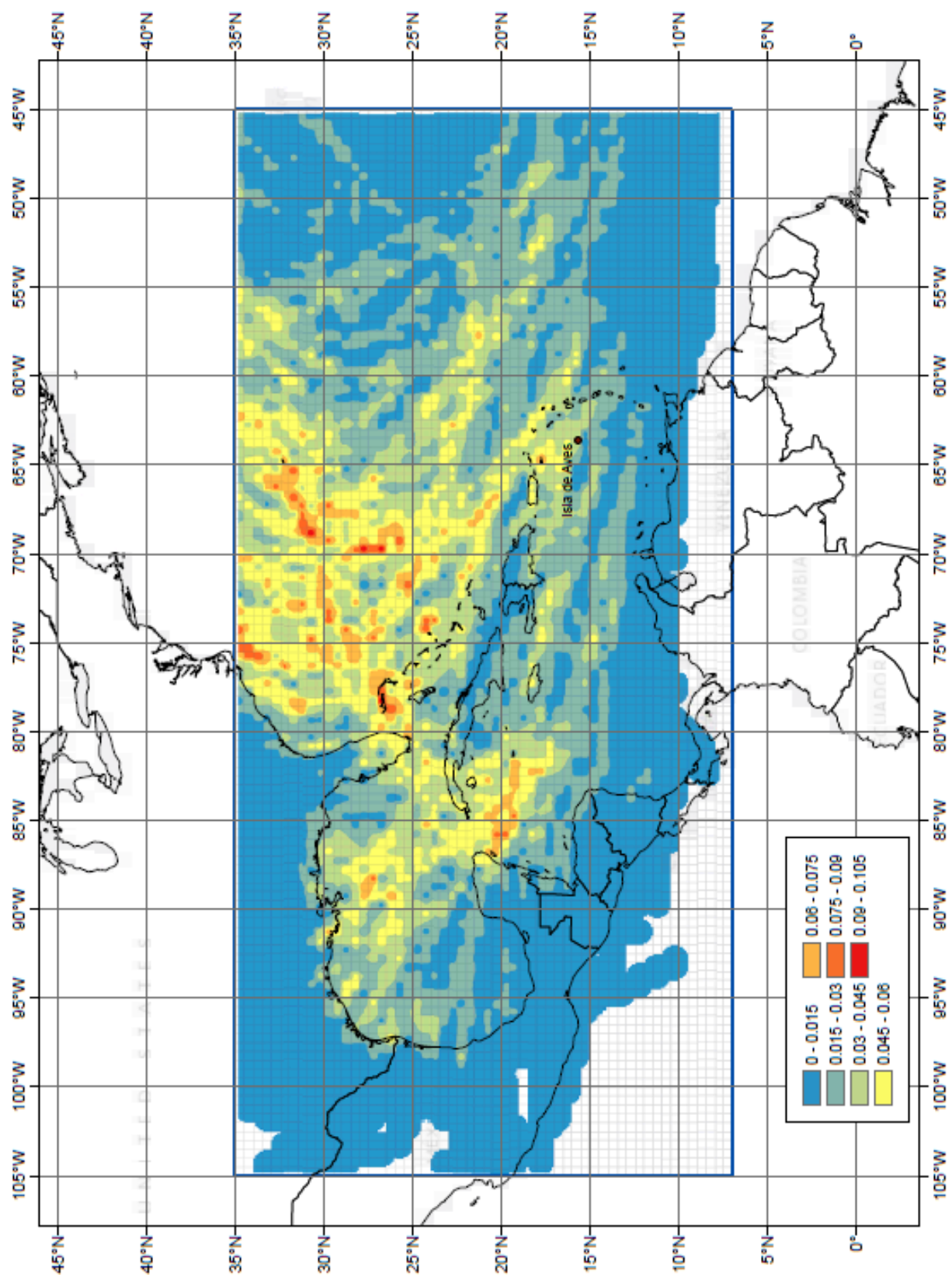


Figura 11-12. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2. Lapso: 1851-2016.

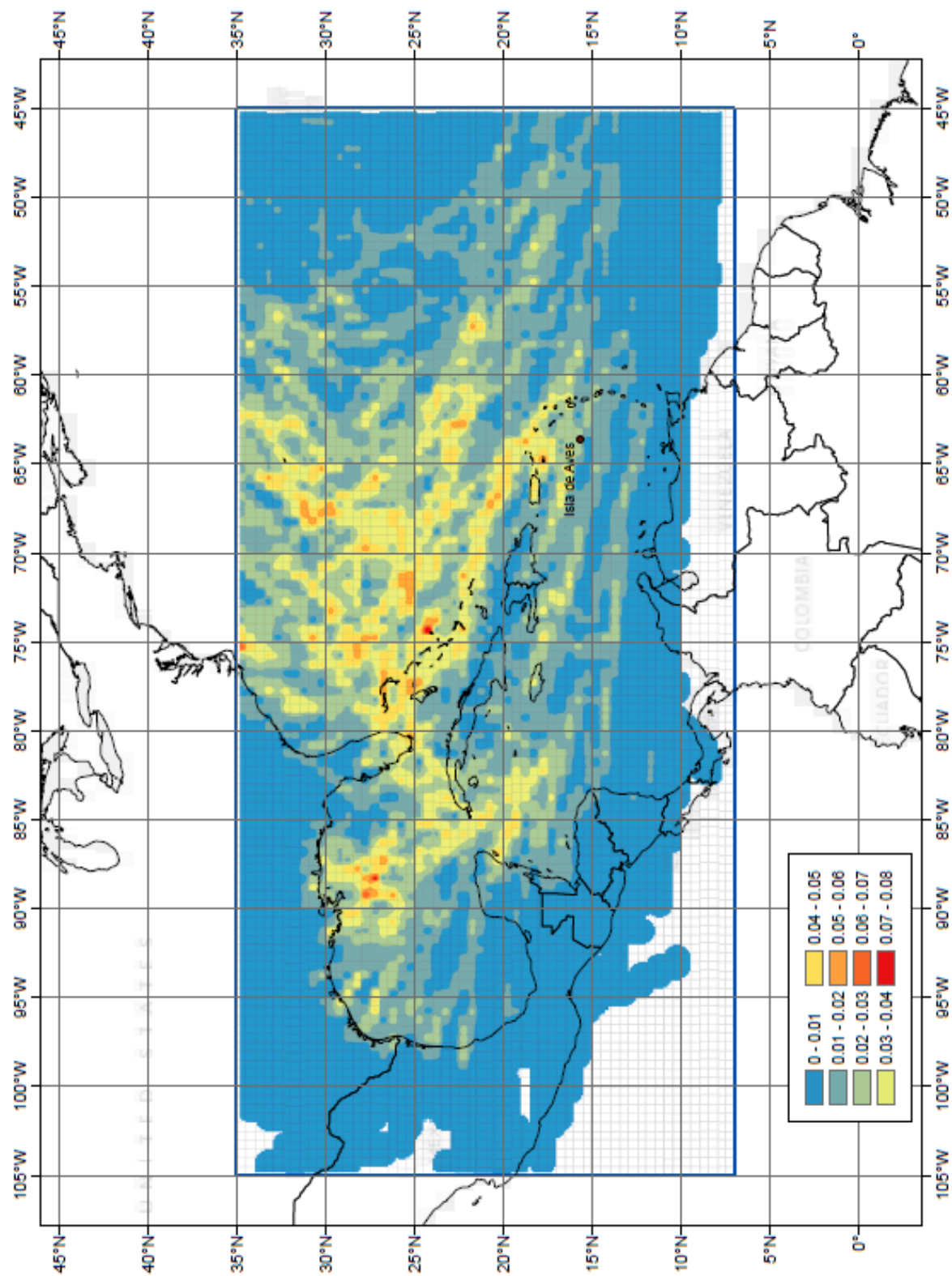


Figura 11-13. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3. Lapso: 1851-2016.

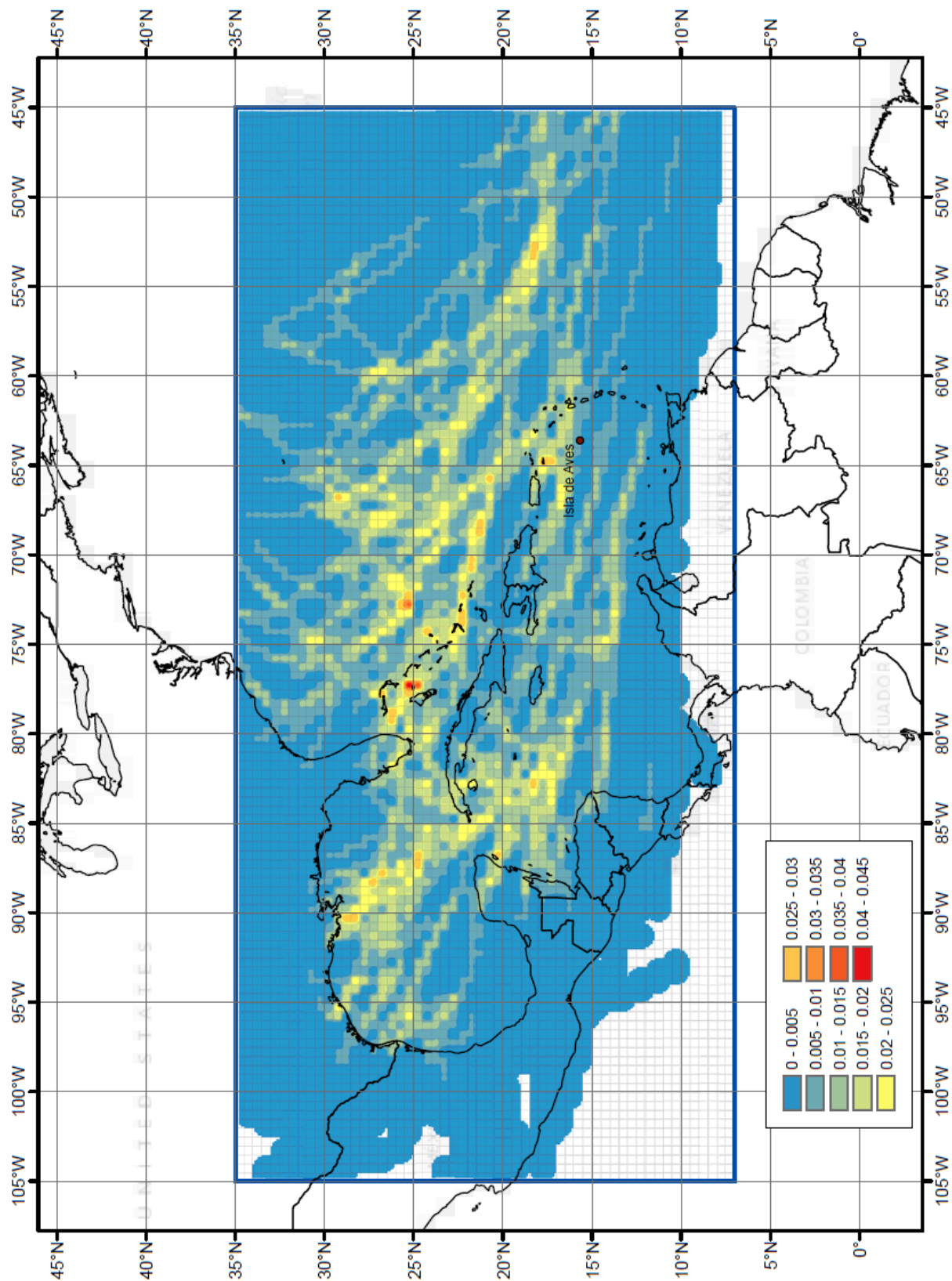


Figura 11-14. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4. Lapso: 1851-2016.

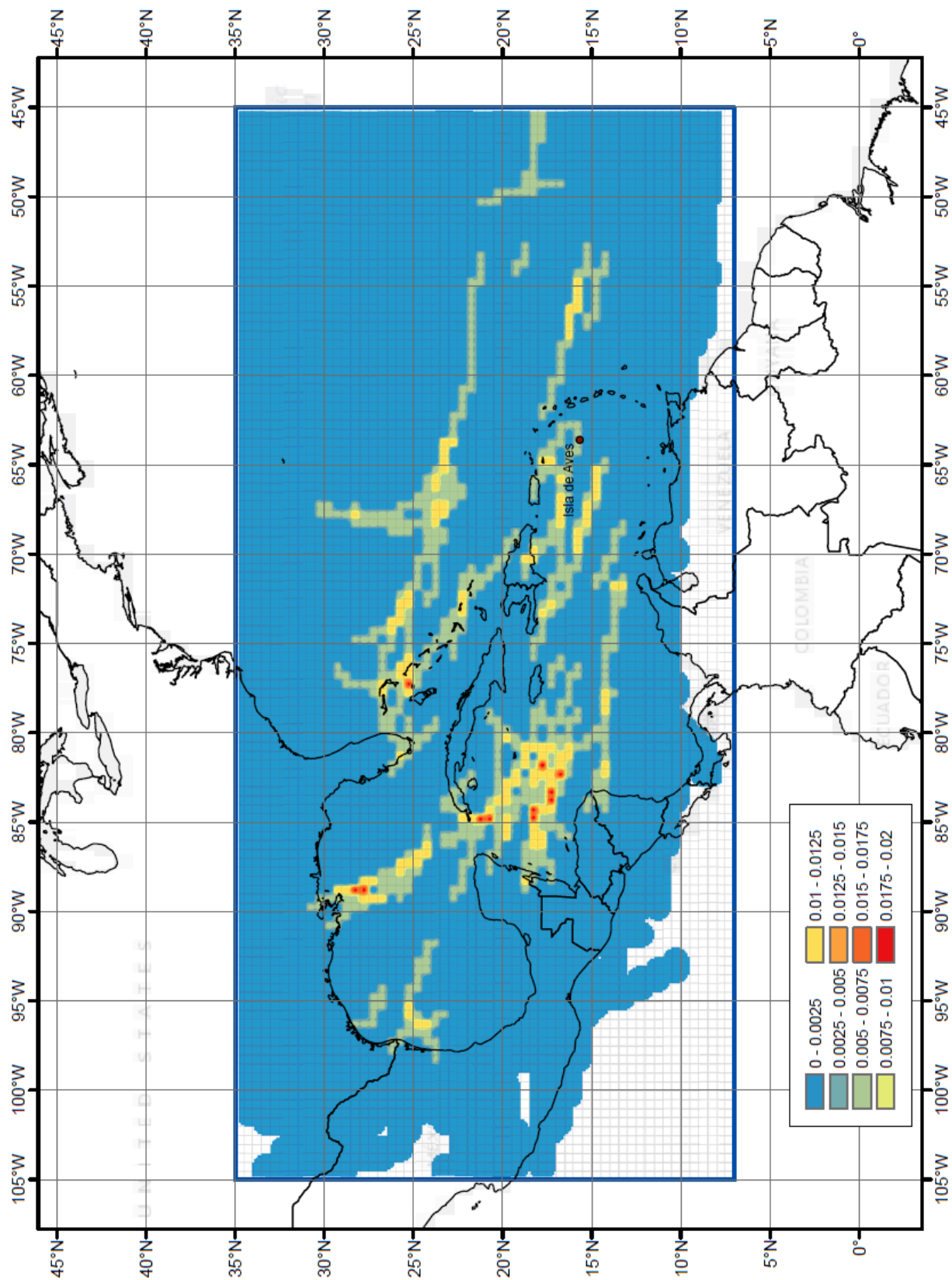


Figura 11-15. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 5. Lapso: 1851-2016.

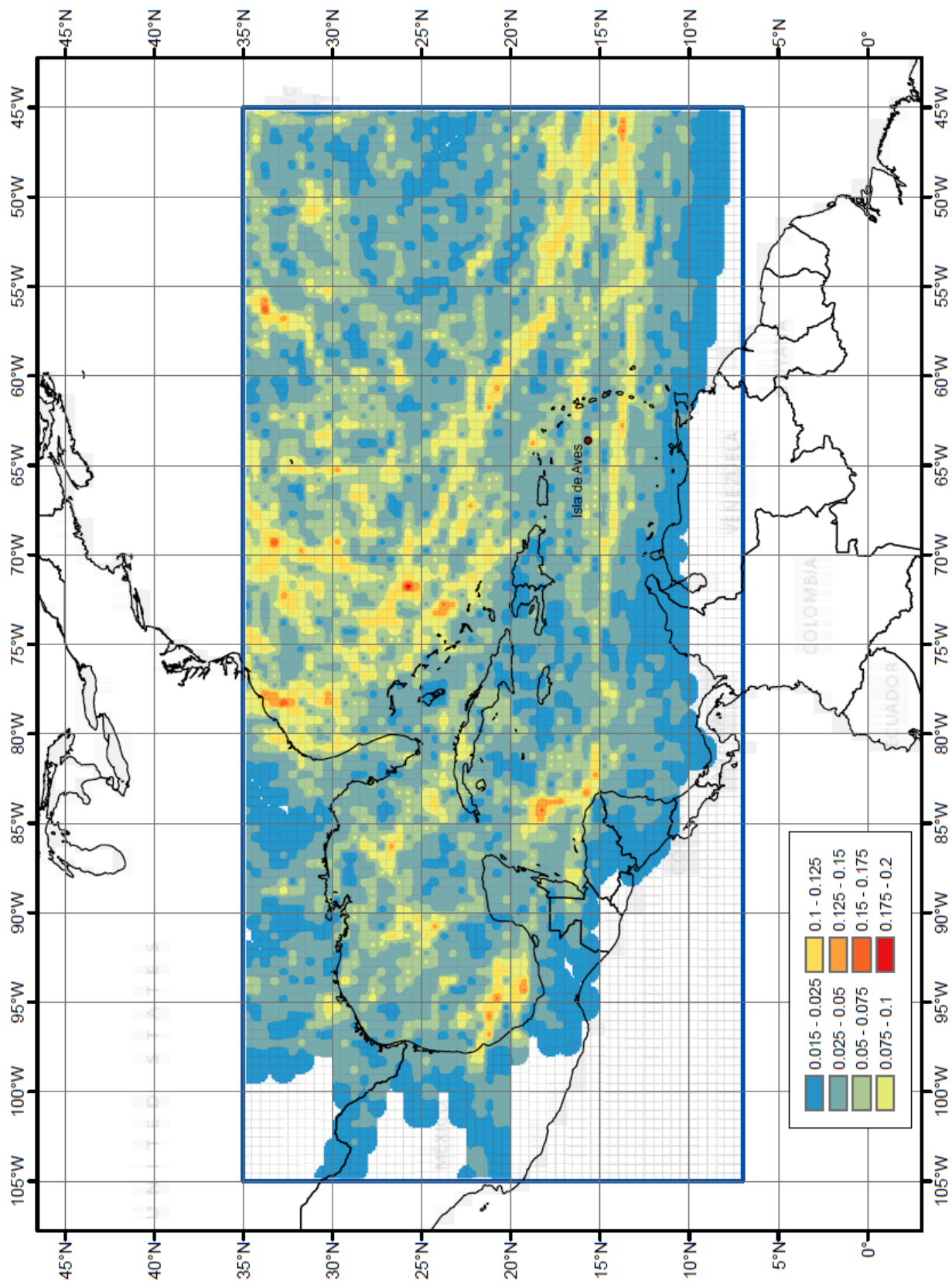


Figura 11-16. Años Neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales.
Lapso: 1950-2016.

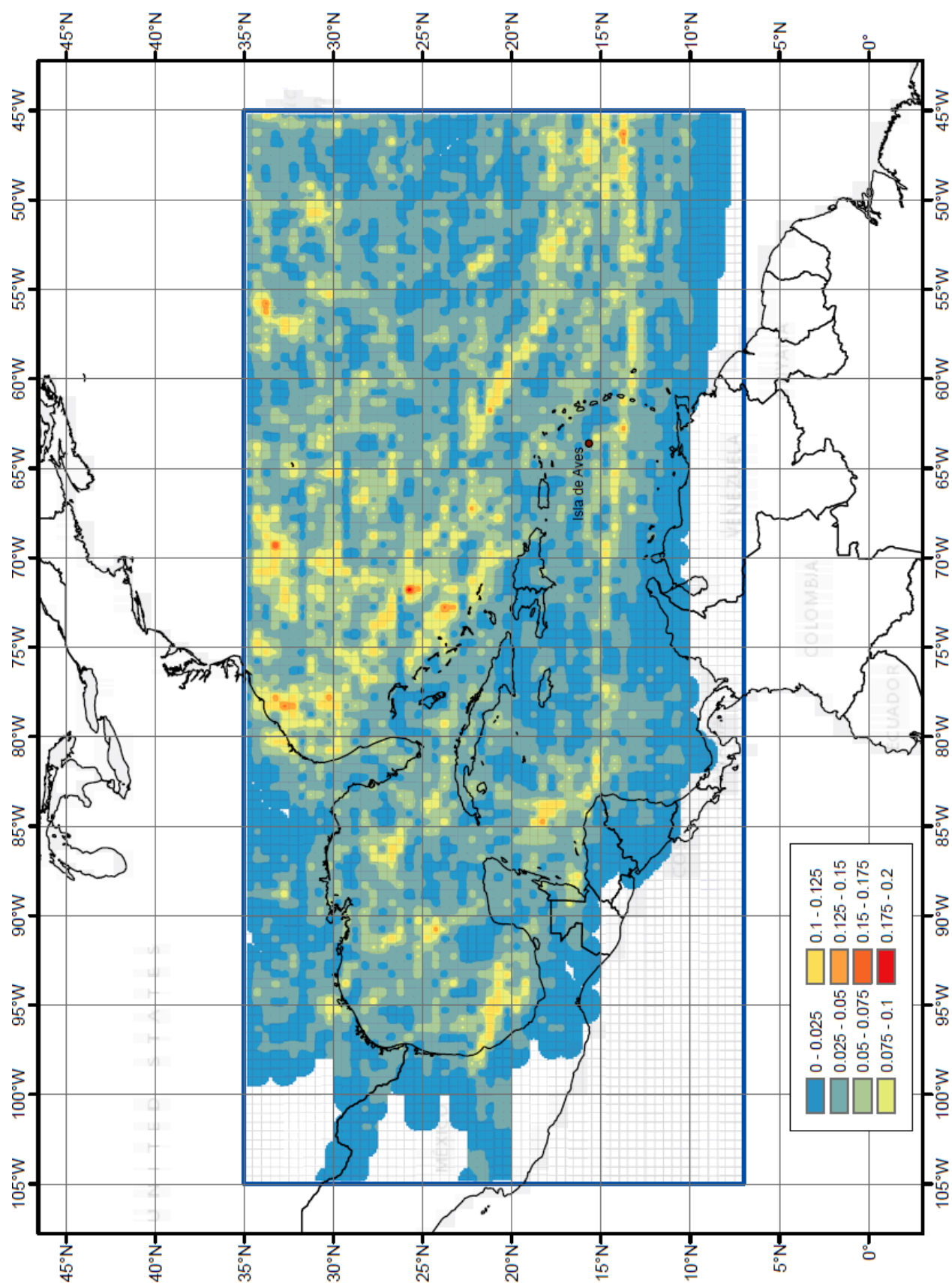


Figura 11-17. Años Neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales.
Lapso: 1950-2016.

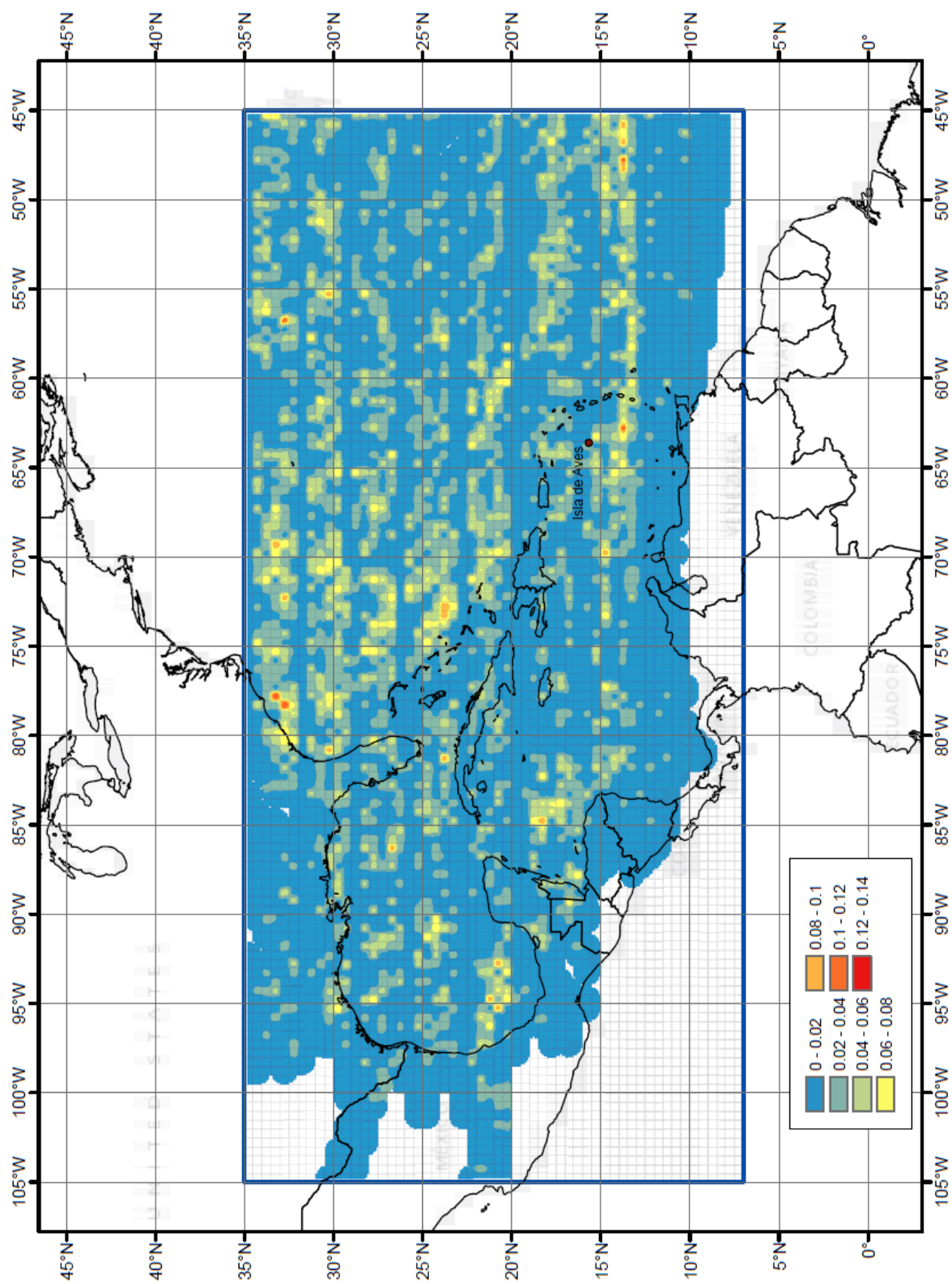


Figura 11-18. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1. Lapso: 1950-2016.

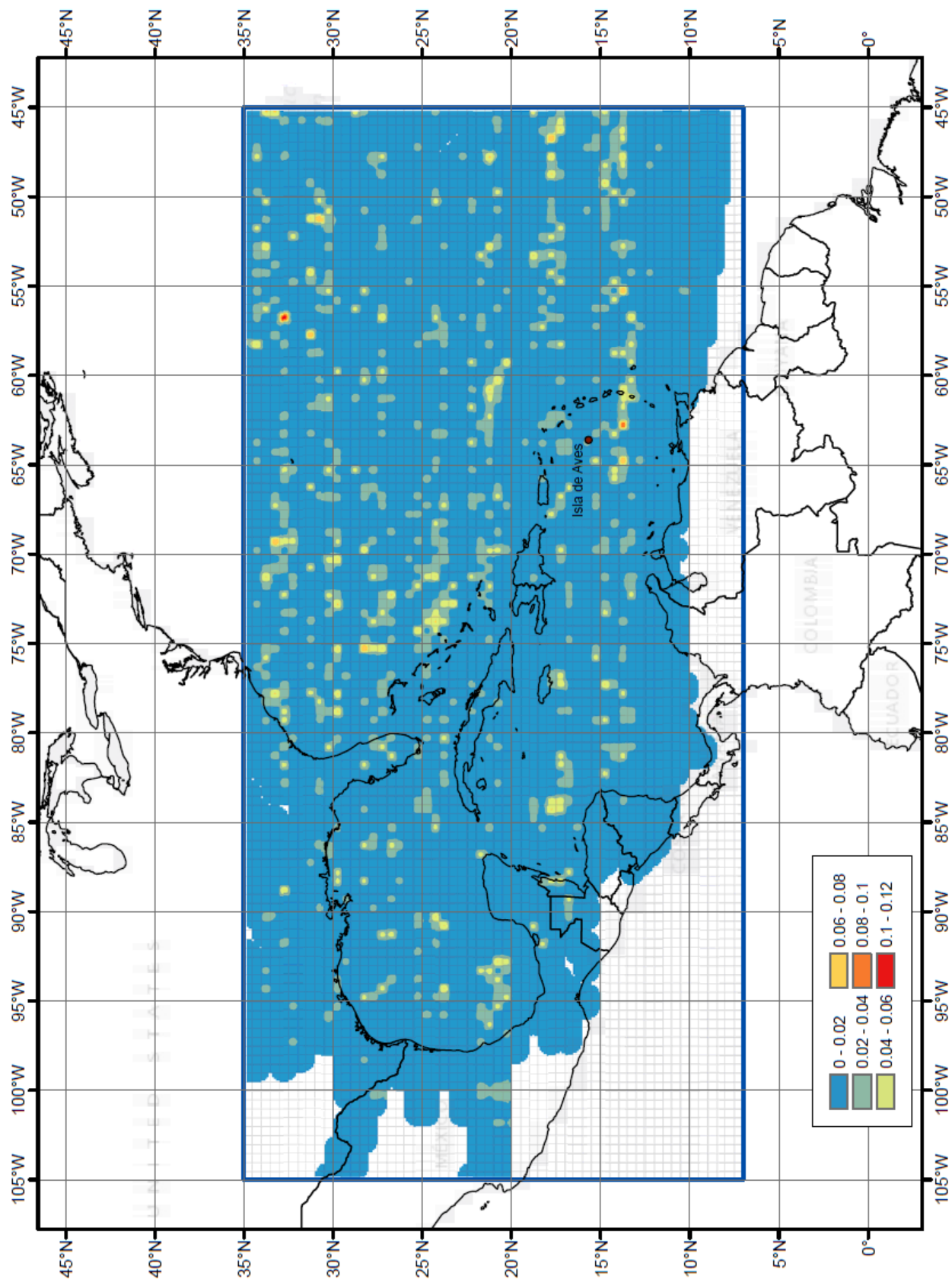


Figura 11-19. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2. Lapso: 1950-2016.

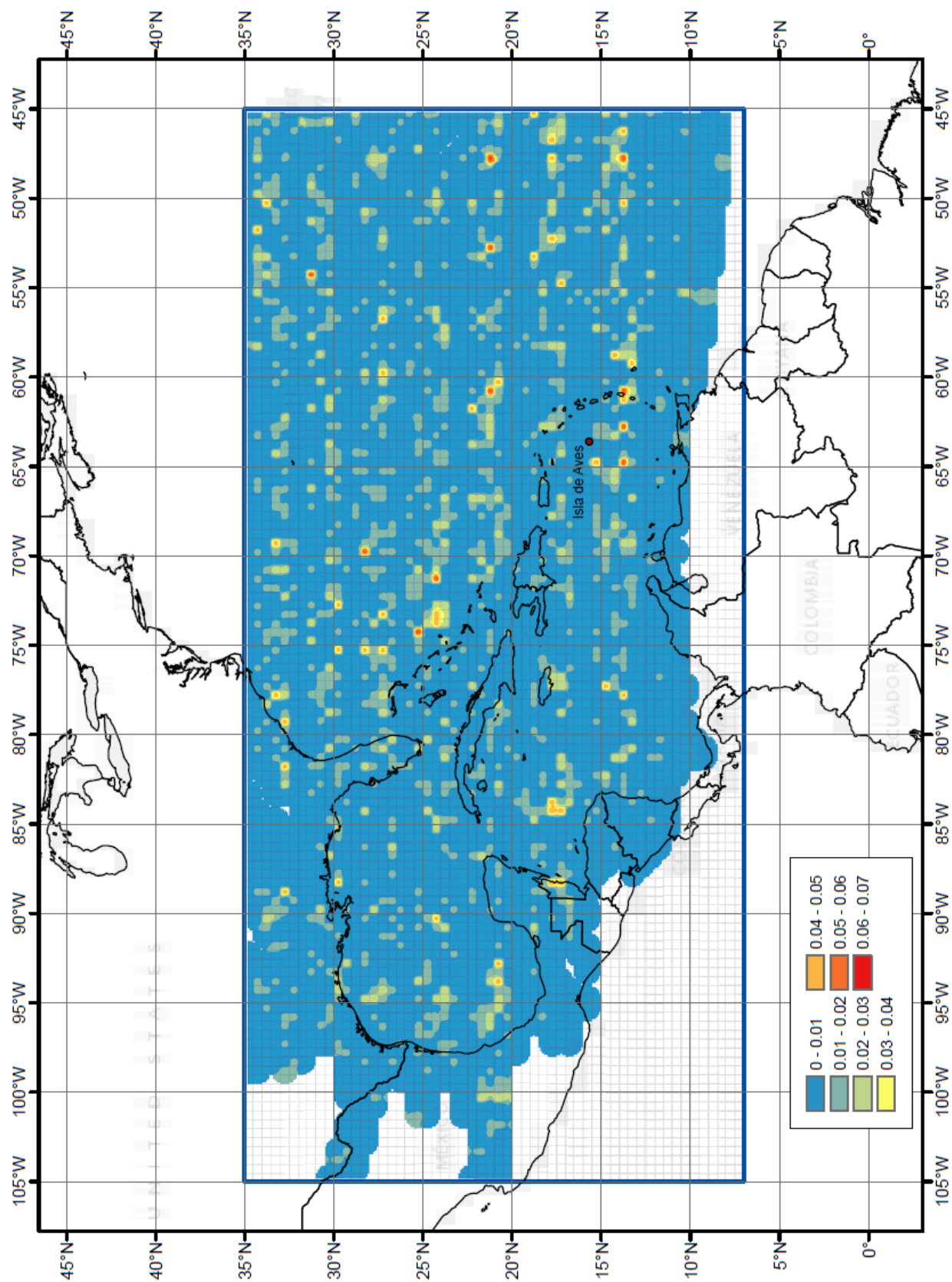


Figura 11-20. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3. Lapso: 1950-2016.

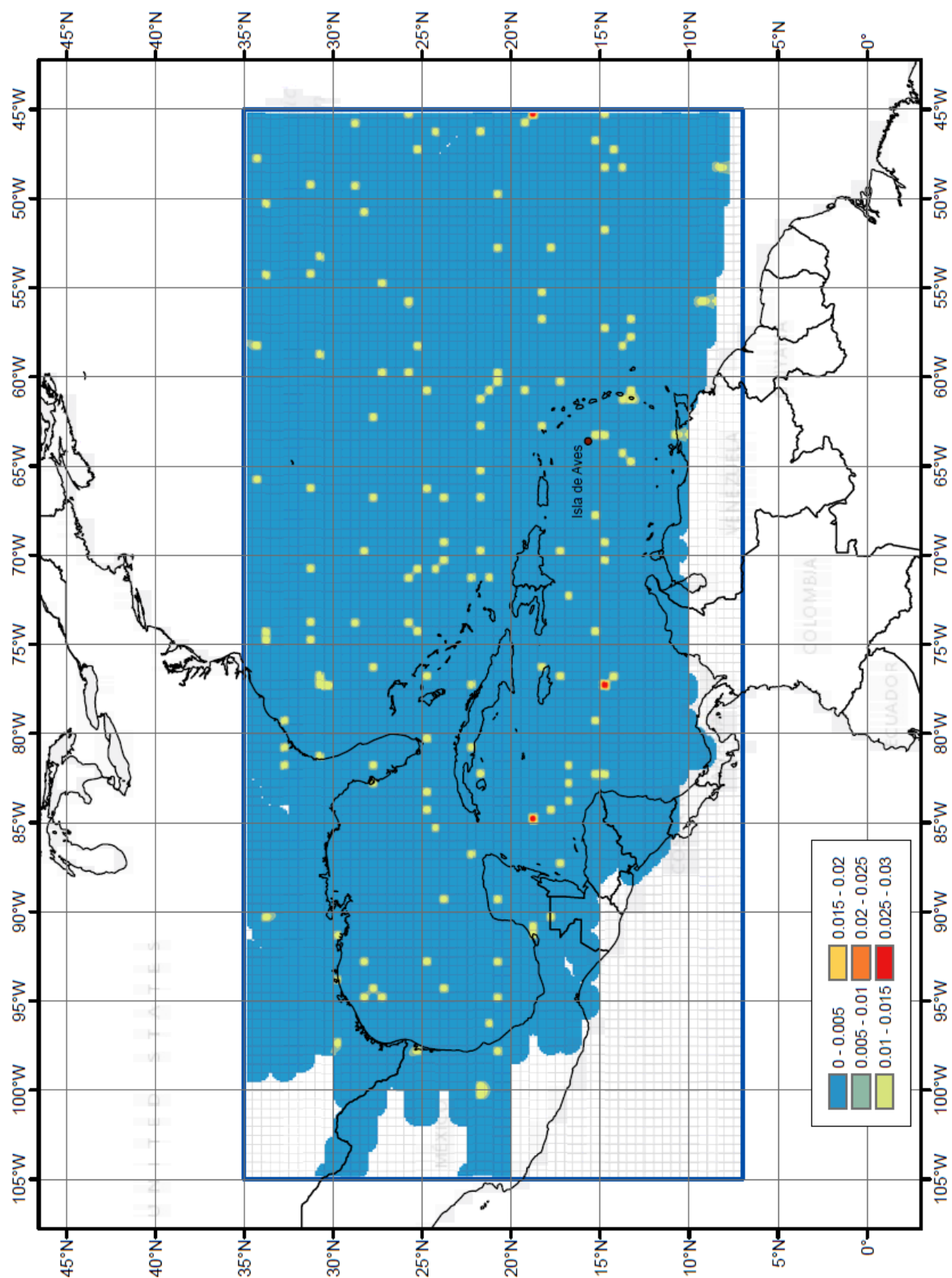


Figura 11-21. Años neutros. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4. Lapso: 1950-2016.

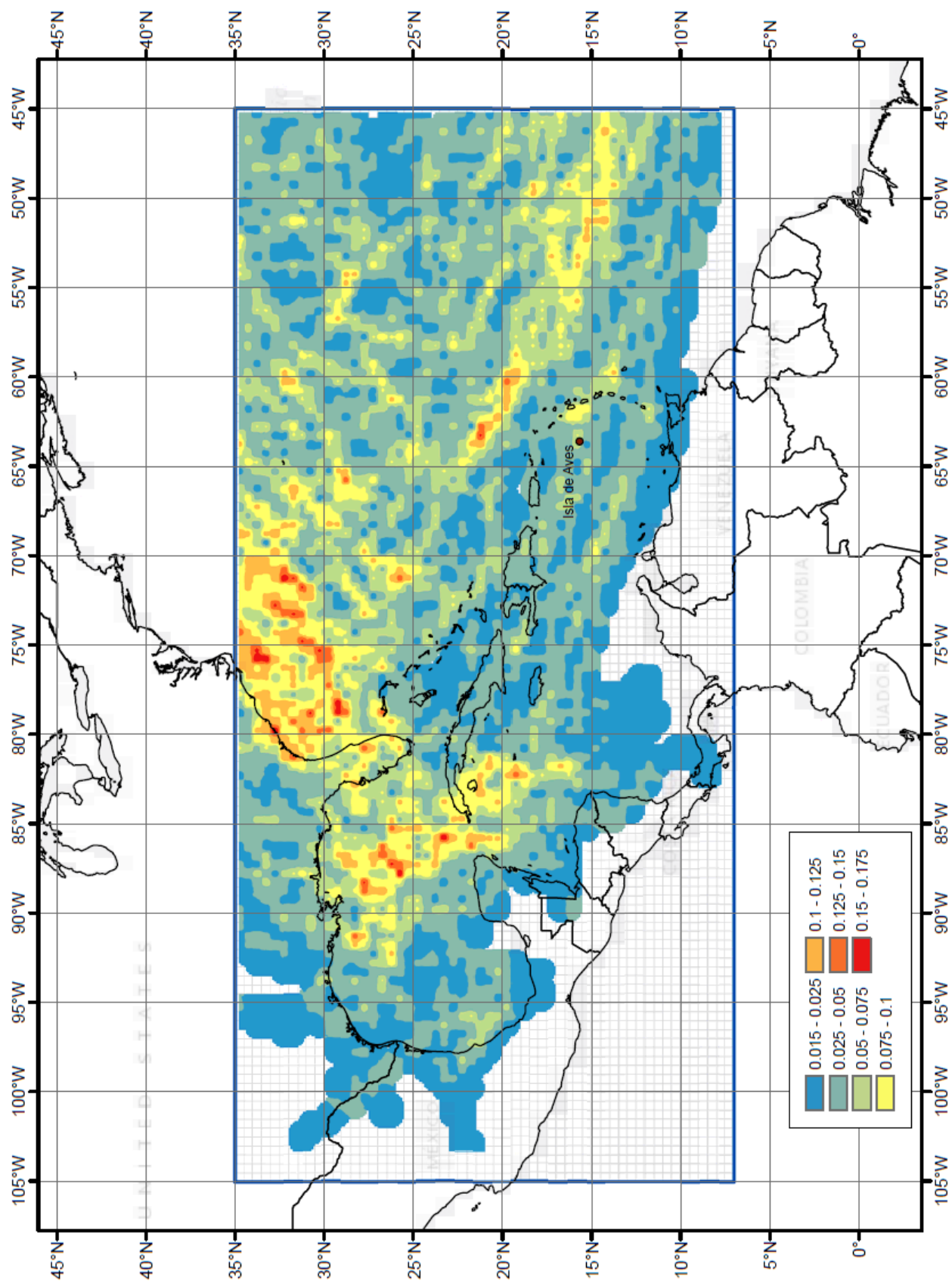


Figura 11-22. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales.
Lapso: 1950-2016.

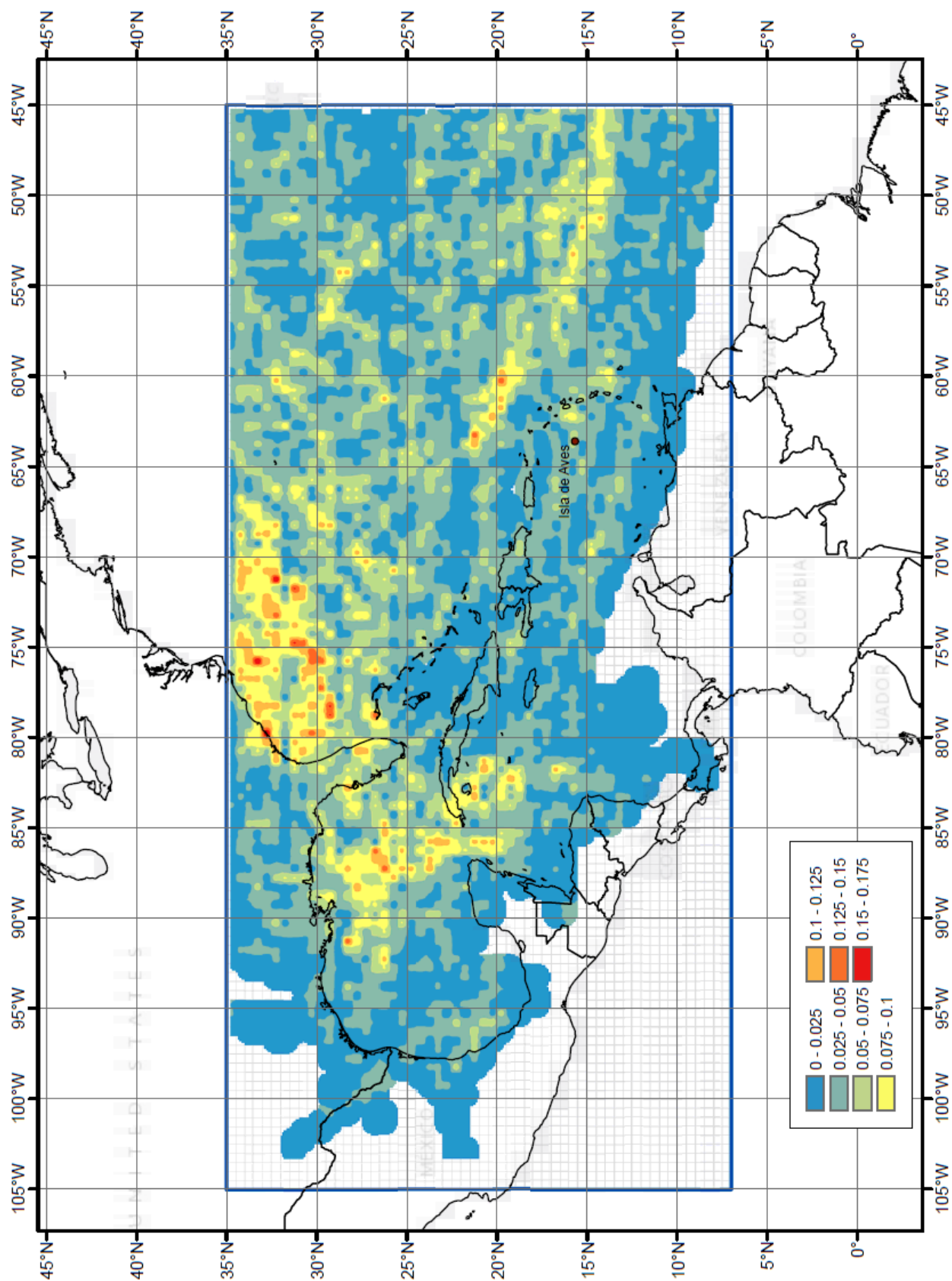


Figura 11-23. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales.
Lapso: 1950-2016.

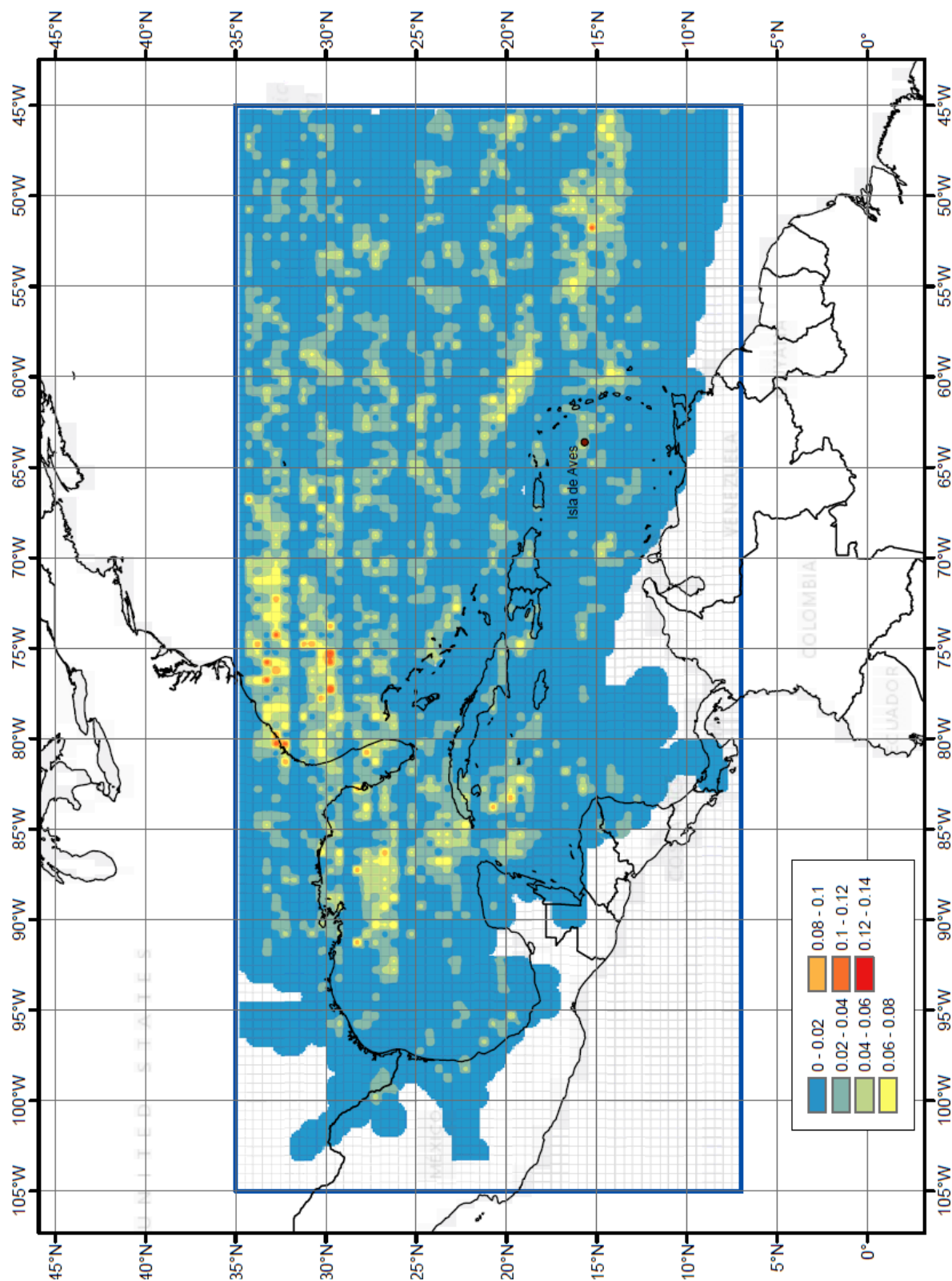


Figura 11-24. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1.
Lapso: 1950-2016.

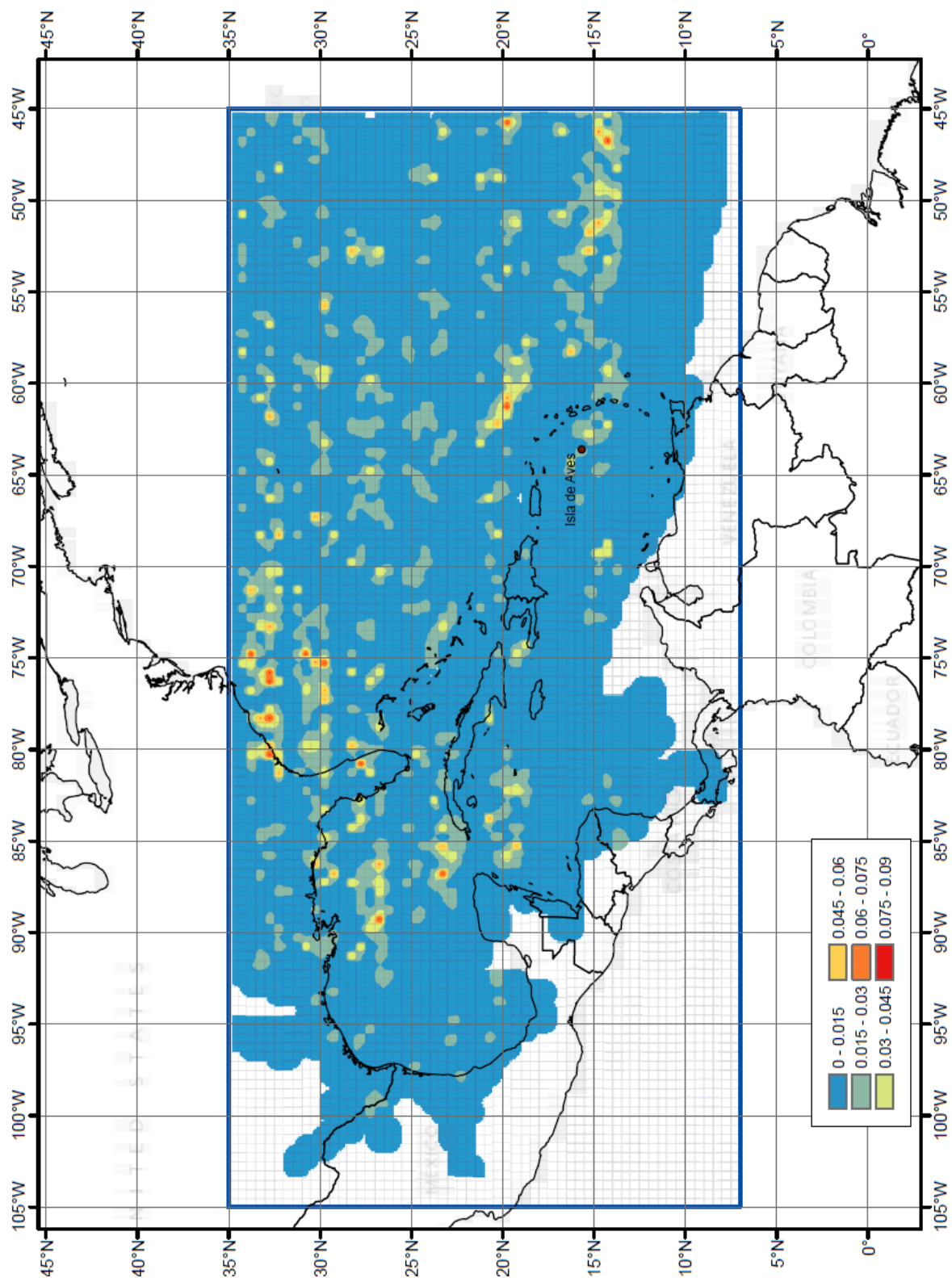


Figura 11-25. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2.
Lapso: 1950-2016.

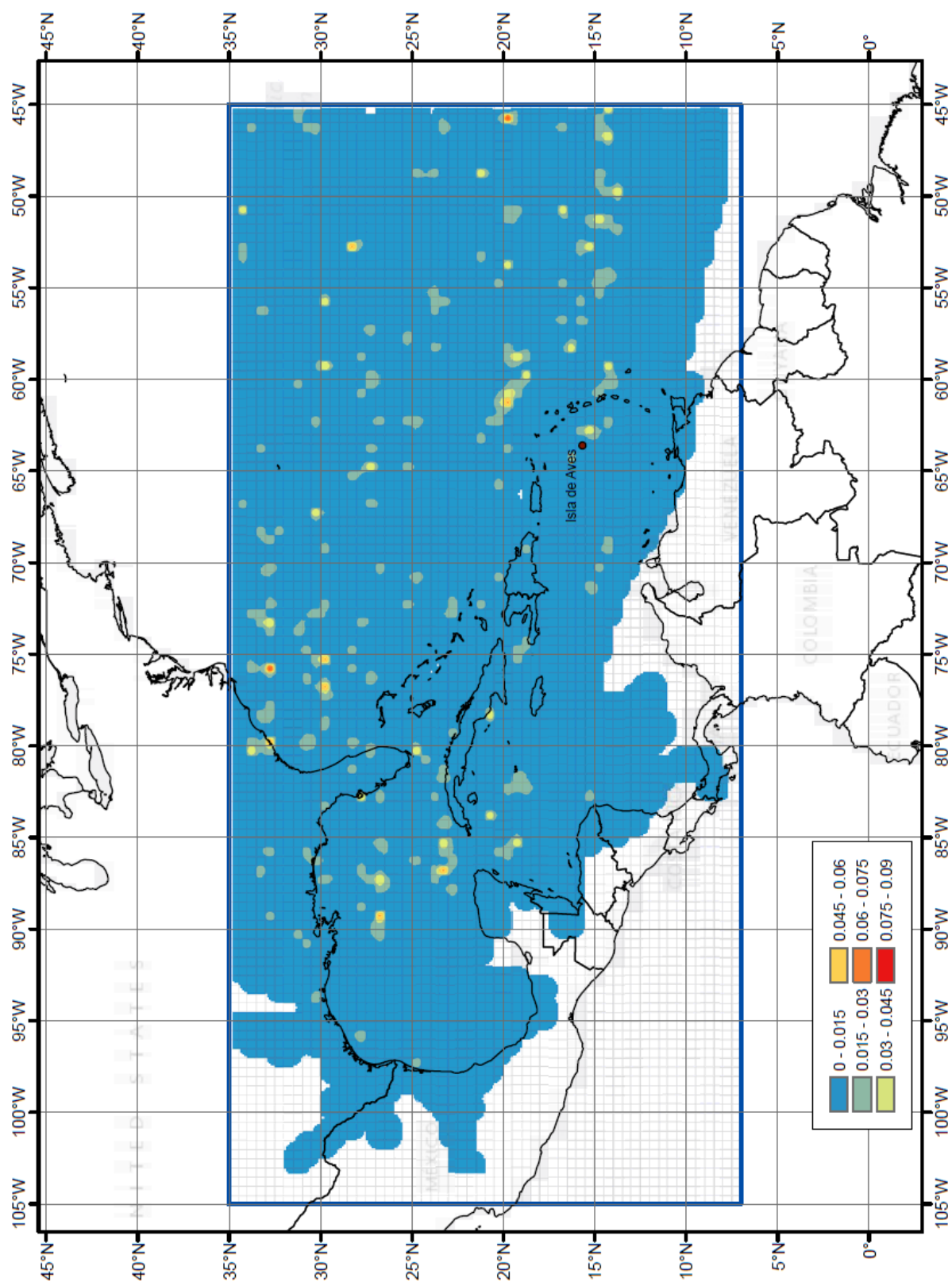


Figura 11-26. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3.
Lapso: 1950-2016.

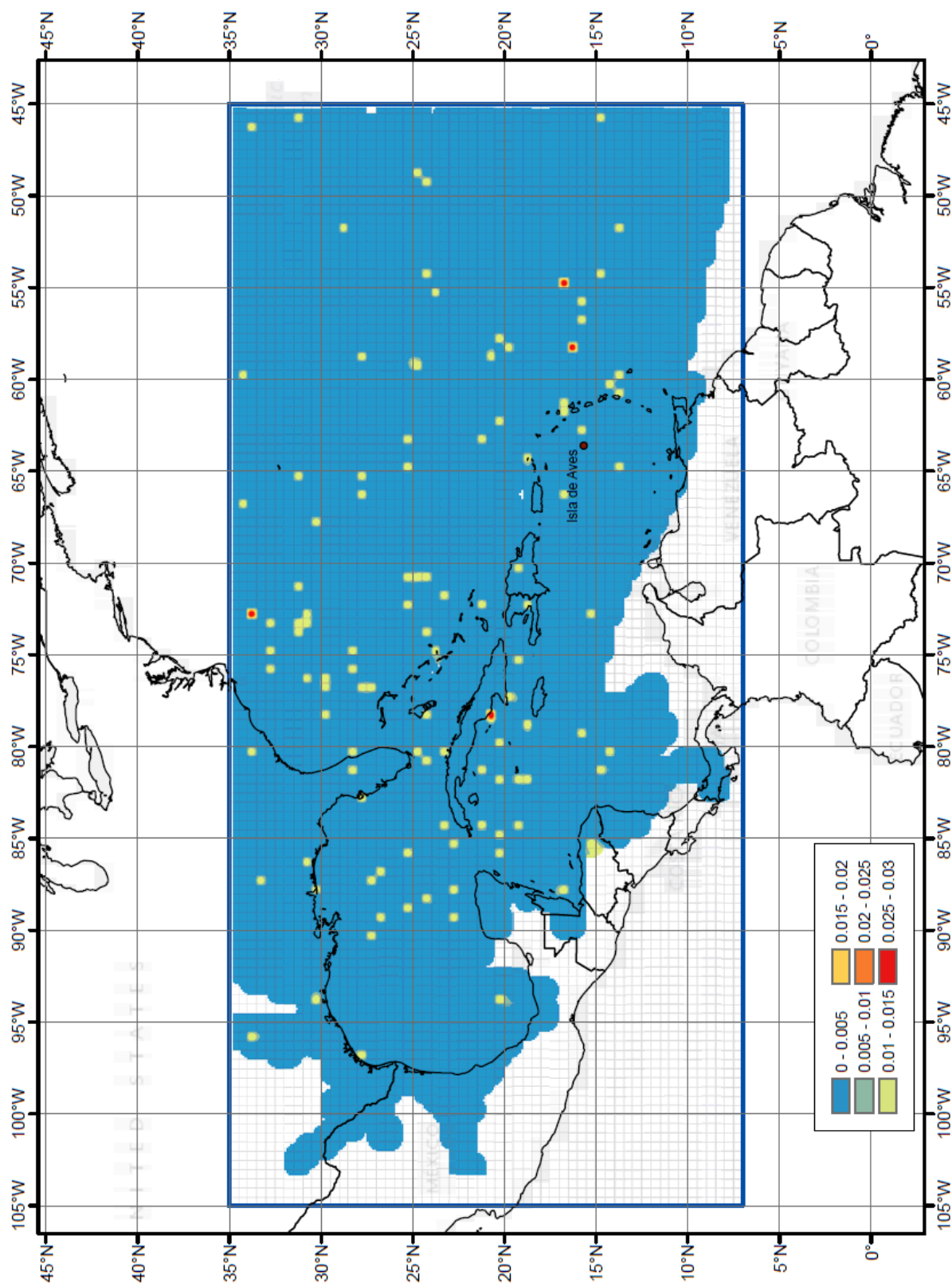


Figura 11-27. Años “El Niño”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4.
Lapso: 1950-2016.

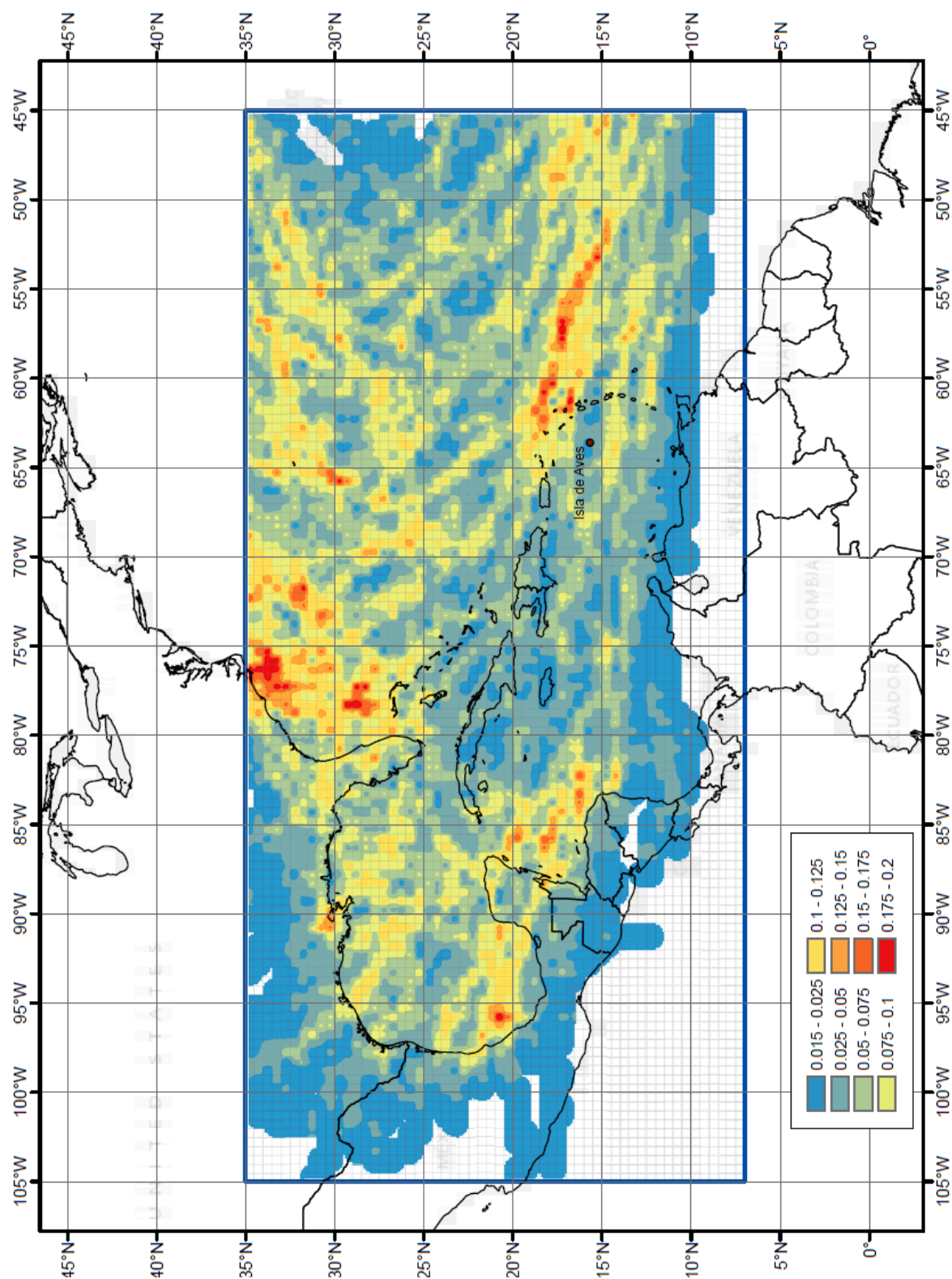


Figura 11-28. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de depresiones tropicales.
Lapso: 1950-2016.

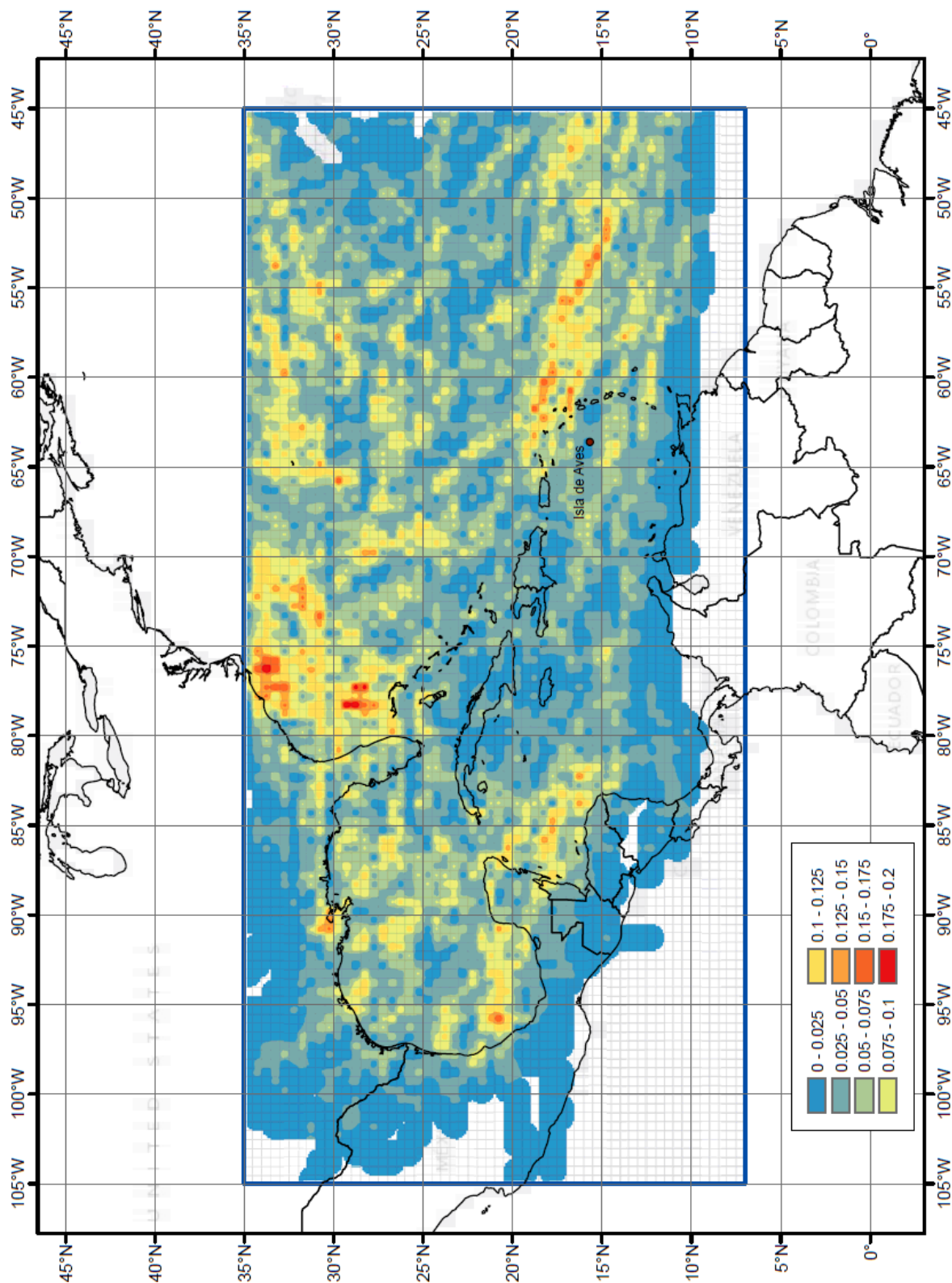


Figura 11-29. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de tormentas tropicales.
Lapso: 1950-2016.

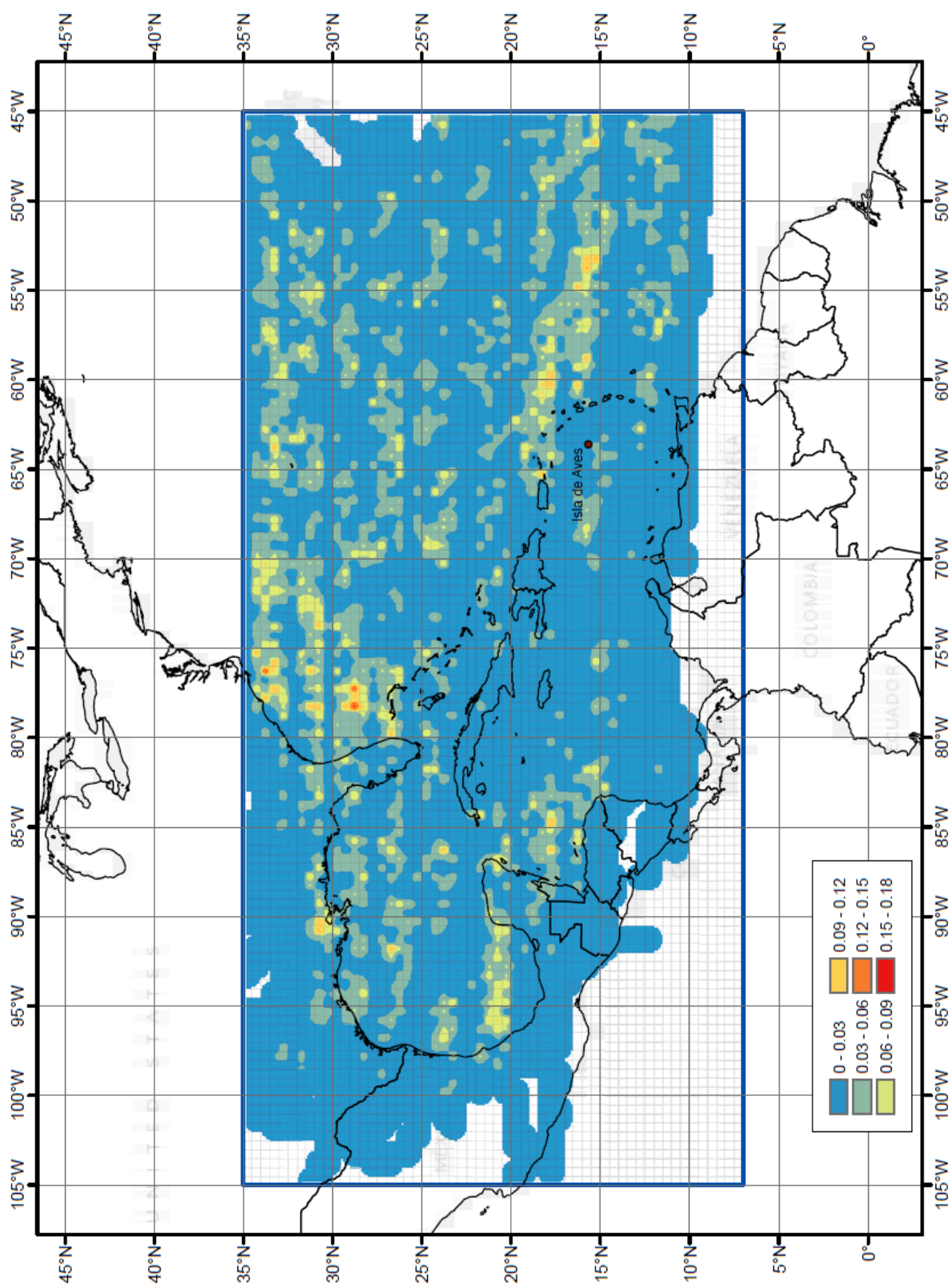


Figura 11-30. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 1.
Lapso: 1950-2016.

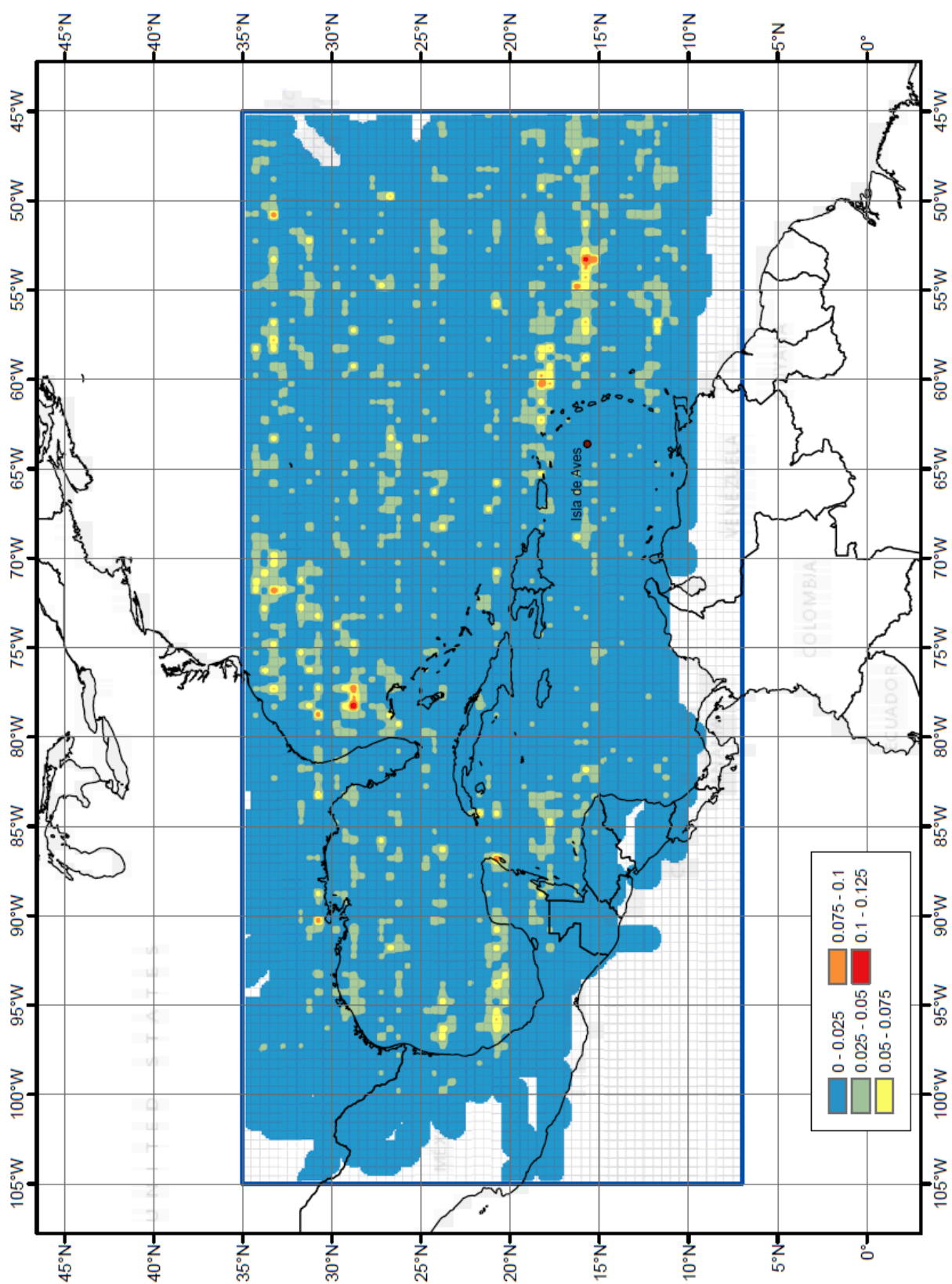


Figura 11-31. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 2.
Lapso: 1950-2016.

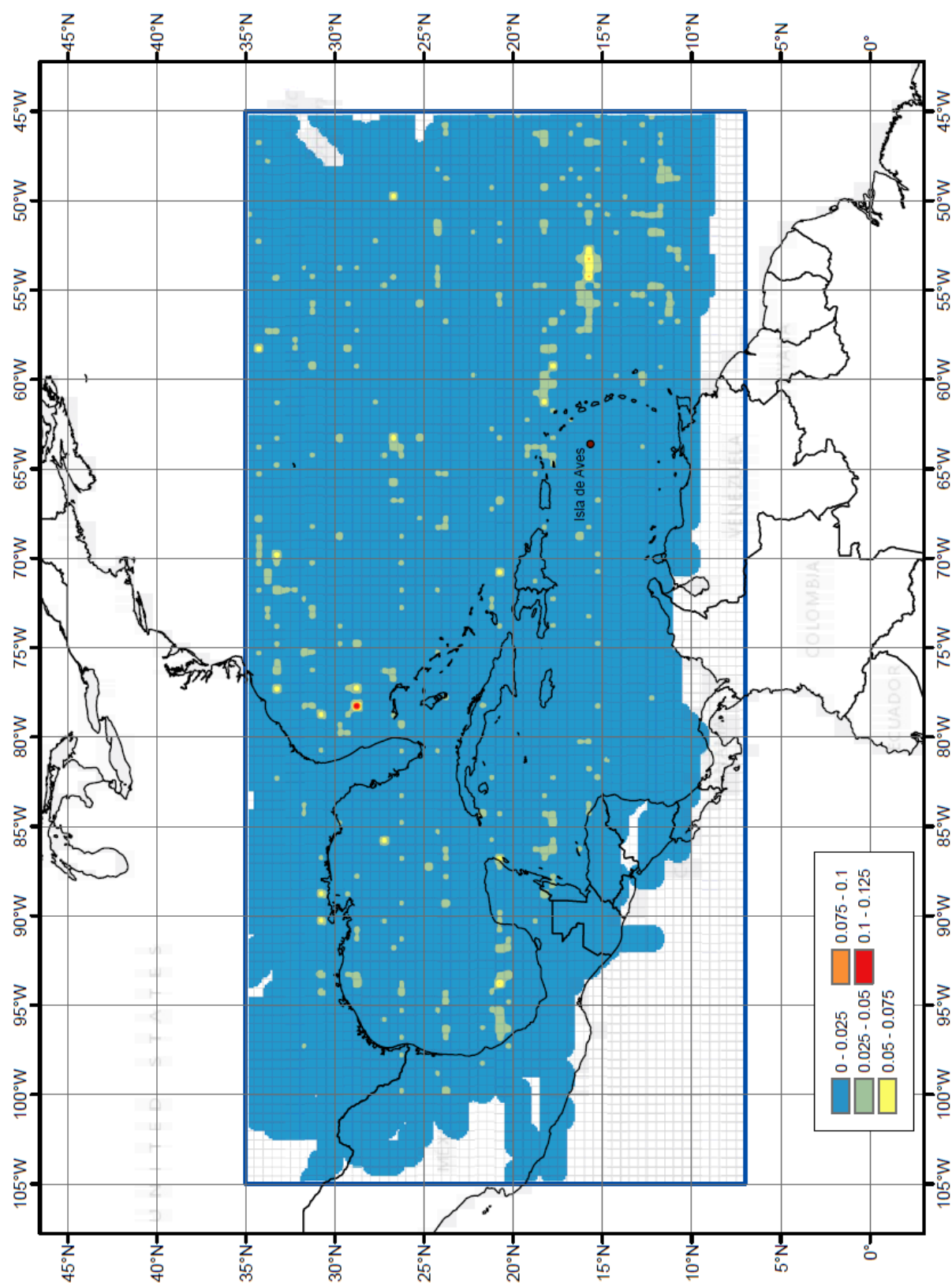


Figura 11-32. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 3.
Lapso: 1950-2016.

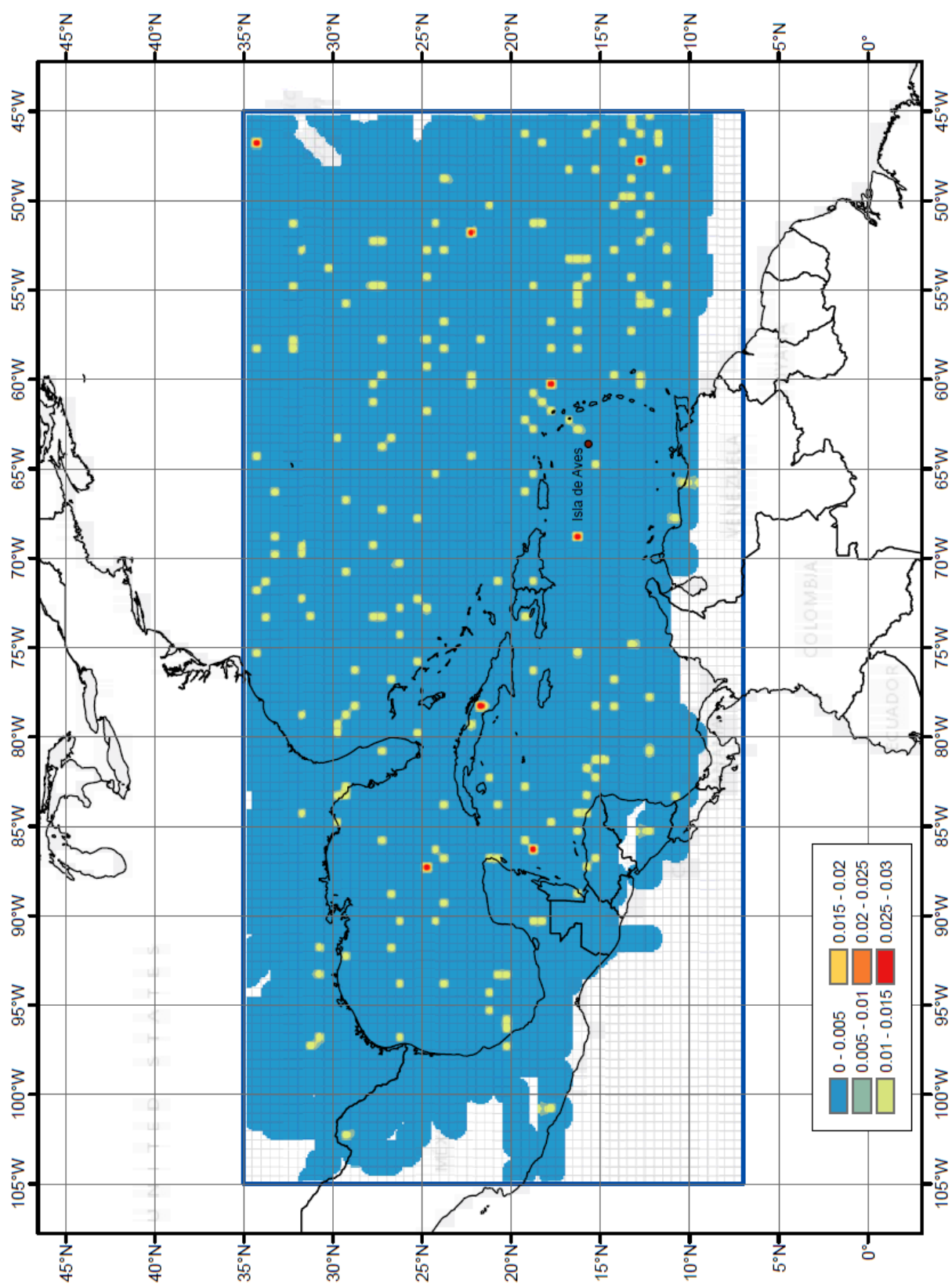


Figura 11-33. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 4.
Lapso: 1950-2016.

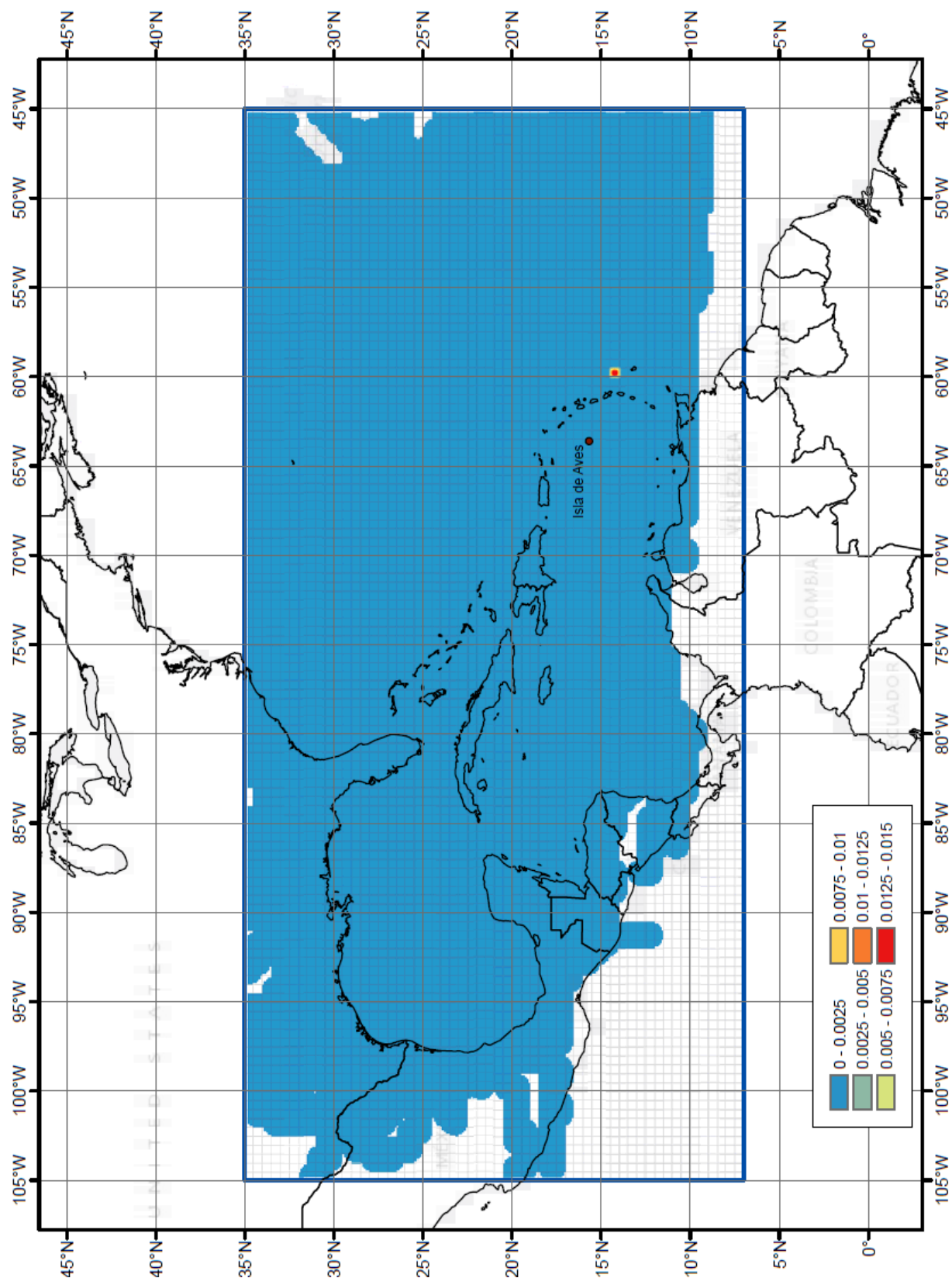


Figura 11-34. Años “La Niña”. Probabilidad anual de ocurrencia de huracanes grado 5.
Lapso: 1950-2016.

11.6 CÁLCULO TÍPICO DE TASA DE EXCEDENCIA, FUNCIÓN DE PELIGRO, PERÍODO DE RETORNO Y RIESGO ASOCIADO AL PASO DE CICLONES TROPICALES POR UN DETERMINADO SECTOR.

11.6.1 Tasa de excedencia.

Para un “nodo de cálculo” cualquiera del dominio de estudio, conformado por una celda de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ se determinó, mediante un software de búsqueda (ARGIS en este caso), el número y tipo de fenómenos naturales (depresiones y tormentas tropicales, o huracanes grado 1 al 5) cuya trayectoria pasó a través del nodo de cálculo estudiado.

En la Tabla 11-4 se muestra un “conteo ficticio” hecho sobre una celda de cálculo como la mostrada en la Figura 7-1, que sirve para ejemplificar los cálculos reales hechos sobre cada una de las celdas o “nodos de cálculo” que constituyen el dominio general de estudio.

Tabla 11-4. Resultado de una “búsqueda típica” de cuantificación y caracterización en cada celda de cálculo que conforma el dominio de estudio.

Intensidad (i)	Categoría	M_i
1	DT	1
2	TT	15
3	H1	3
4	H2	4
5	H3	3
6	H4	1
7	H5	1
Total		28

Donde M_i es la cantidad de eventos de intensidad i máxima alcanzada por un evento, determinada a partir del valor de la velocidad del viento máximo sostenido (VMS) obtenido a partir de la base de datos de la NOAA.

A partir de lo anterior se infiere que si dentro de la celda de cálculo, un evento o fenómeno determinado cambia de intensidad, para clasificar dicho evento dentro de una determinada categoría se tomó como indicador el valor de la máxima intensidad que el mismo tuvo dentro del dominio de cálculo.

Una vez obtenida la información se procedió a calcular la tasa de excedencia $v(i)$ asociada a cada uno de los niveles de intensidad i excedidos durante la ocurrencia de un evento determinado. En otras palabras, si se alcanzó el valor del VMS asociado a un evento de intensidad i y que presenta una ocurrencia M_i , se registran cada uno de los niveles de menor intensidad que son rebasados durante el mismo evento.

Si por ejemplo, se alcanza un VMS de intensidad 7 (Categoría H5 y ocurrencia $M_i=0$), eso implica que también se registra la ocurrencia del mismo evento pero para las diferentes intensidades inferiores, es decir y de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 11-4, si se tienen 15 eventos con intensidad 2 (tormentas tropicales) y 1 evento con intensidad 1, implicaría

que se tienen 17 eventos que igualaron o superaron la intensidad 1 y 15 eventos que superaron o igualaron a la intensidad 2.

De acuerdo con lo anterior, una expresión matemática que permite obtener la tasa de excedencia a partir de registros agrupados de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 11-4 es la siguiente:

$$v(i) = \sum_{j=0}^{n-i} M_{n-j} \quad (11.2)$$

donde n es el máximo nivel de intensidad i que se puede alcanzar, que para el caso de los fenómenos meteorológicos es 7.

De acuerdo con los registros mostrados en la Tabla 11-4 se tendría que la tasa de excedencia $v(i)$ para las diferentes intensidades serían las siguientes:

$$v(1) = \sum_{j=0}^6 M_{7-j} = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 + M_1 = 1+1+3+4+3+15+1 = 28$$

$$v(2) = \sum_{j=0}^5 M_{7-j} = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 = 1+1+3+4+3+15 = 27$$

$$v(3) = \sum_{j=0}^4 M_{7-j} = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 = 1+1+3+4+3 = 12$$

$$v(4) = \sum_{j=0}^3 M_{7-j} = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 = 1+1+3+4 = 9$$

$$v(5) = \sum_{j=0}^2 M_{7-j} = M_7 + M_6 + M_5 = 1+1+3 = 5$$

$$v(6) = \sum_{j=0}^1 M_{7-j} = M_7 + M_6 = 1+1 = 2$$

$$v(7) = \sum_{j=0}^0 M_{7-j} = M_7 = 1$$

Para cualquier caso real, los valores obtenidos están asociados a algún período de tiempo. Para efectos de este ejemplo, supóngase que en el “nodo de cálculo” los registros fueron obtenidos en un lapso de tiempo de 162 años.

A efectos de trabajar con la tasa de excedencia, es muy útil y práctico manejar el concepto de tasa de excedencia anual, razón por la cual los valores de $v(i)$ obtenidos para un determinado lapso de tiempo, se acostumbra dividirlos entre dicho lapso de tiempo (para el ejemplo se dividirán entre 162), por lo que los valores obtenidos anteriormente quedan expresados en la Tabla 11-5, de la siguiente forma:

Tabla 11-5. Tasa de excedencia.

Intensidad (i)	Tasa de excedencia anual (vi)
1	0.1728
2	0.1667
3	0.0741
4	0.0556
5	0.0309
6	0.0123
7	0.0062
8	0.0000

En la tabla anterior se incluyó una intensidad adicional $i=8$ a los fines de utilizar en forma correcta la definición asociada a la función de peligro, que no es otra que la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante un cierto período de tiempo en una localidad dada, pudiéndose al mismo tiempo observar como decrece la tasa de excedencia anual conforme aumenta la intensidad (ver Figura 11-35) procediéndose a continuación a calcular el peligro y los períodos de retorno vinculados a cada una de las intensidades que puede presentar el fenómeno estudiado.

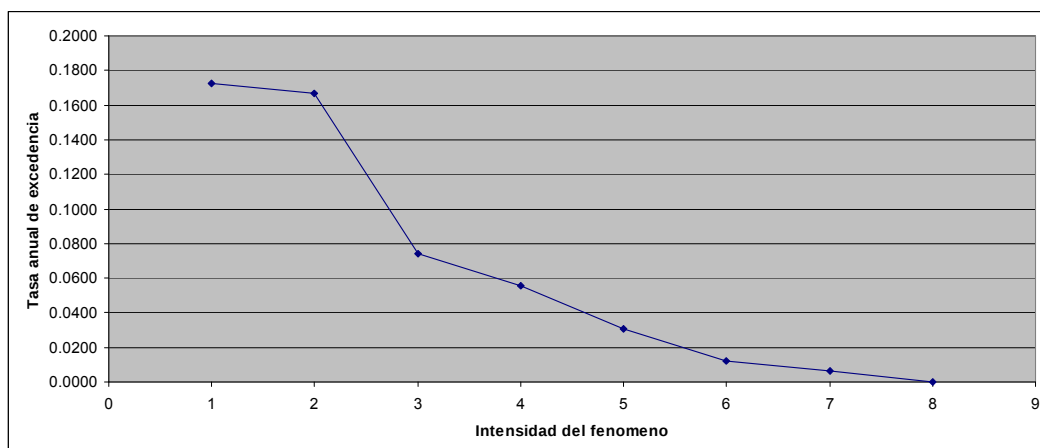


Figura 11-35. Tasa de excedencia anual asociada a la intensidad del fenómeno.

11.6.2 Peligro.

De acuerdo con su definición, el peligro no es otra cosa que la densidad de probabilidades $P(i)$ de la función intensidad (i), y puede obtenerse derivando $v(i)$ y normalizando posteriormente, por lo que:

$$P(i) = -k \frac{dv(i)}{di} \quad (11.3)$$

donde la constante k es tal que la integral de $p(i)$ es igual a 1, y $dv(i)/di$ es proporcional al número de eventos con intensidad igual a i o más rigurosamente, con intensidad entre $i+di$, por lo que integrando la ecuación 11.3 se tiene que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(i) di = -k \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dv(i)}{di} di = 1 \quad (11.4)$$

$$1 = -k \int_1^8 \frac{dv(i)}{di} di = -k [v(i)]_1^8 = -k [v(8) - v(1)]$$

$$1 = k(0 - 0.173) \Rightarrow k = \frac{1}{0.173}$$

teniéndose por tanto que en general

$$k = \frac{1}{v(1)} \quad (11.5)$$

por lo que en este caso, la función de peligro queda definida de la siguiente forma:

$$P(i) = -\frac{1}{0.173} \frac{dv(i)}{di} \quad (11.6)$$

mientras que la probabilidad de que se presente un evento que exceda la intensidad i , sin que avance al siguiente nivel, queda dada por:

$$P(i) = -\frac{1}{0.173} \int_i^{i+1} \frac{dv(i)}{di} di \quad (11.7)$$

Para los datos del ejemplo presentado (ver Tabla 11-4 y Tabla 11-5) se tiene que para el caso de $i=1$:

$$P(1) = -\frac{1}{0.173} \int_1^2 \frac{dv(i)}{di} di = -\frac{1}{0.173} [v(2) - v(1)] = -\frac{1}{0.173} [0.167 - 0.173] = 0.0357$$

mientras que para el caso extremo de $i=7$ se tiene:

$$P(7) = -\frac{1}{0.173} \int_7^8 \frac{dv(i)}{di} di = -\frac{1}{0.173} [v(8) - v(7)] = -\frac{1}{0.173} [0.000 - 0.000] = 0$$

Estas tasas de excedencia corresponden para el caso hipotético que se maneja, a un período de 162 años, por lo que cada valor $P(i)$ obtenido se divide entre el valor del intervalo de tiempo analizado, presentándose en la Tabla 11-6 el valor de la función peligro anualizada, para cada una de las intensidades que pudiera tomar el fenómeno (entendiéndose a éste como una amenaza) estudiado:

Tabla 11-6. Función de peligro anual asociada a cada intensidad de la amenaza estudiada.

Intensidad (i)	(Pi)
1	0.0357
2	0.5357
3	0.1071
4	0.1429
5	0.1071
6	0.0357
7	0.0357
8	0.0000
Σ	1.0000

11.6.3 Período de retorno.

El período de retorno se define como el tiempo promedio en que vuelve a ocurrir la excedencia de determinada intensidad i , obteniéndose a través del cálculo del recíproco de la tasa de excedencia de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Tr(i) = \frac{1}{v(i)} \quad (11.8)$$

teniéndose para el caso del presente ejemplo, los resultados mostrados en la Tabla 11-7.

Tabla 11-7. Períodos de retorno asociados a cada intensidad del fenómeno o amenaza estudiada.

Intensidad (i)	Tr_i (años)
1	5.8
2	6.0
3	13.5
4	18.0
5	32.4
6	81.0
7	162.0

11.6.4 Cálculo del riesgo, su relación con el valor de los bienes expuestos y el grado de vulnerabilidad de éstos.

Dentro de la ecuación que sirve para evaluar el riesgo (ecuación 11.1), se entiende por valor de los bienes expuestos (E) o simplemente elementos en riesgo, a la cuantía de todo aquello que es susceptible de ser afectado durante la ocurrencia de un fenómeno perturbador (amenaza), siendo expresado en muchos casos en términos monetarios, aunque en muchas ocasiones tenga que expresarse en otro tipo de términos tales como vidas humanas.

En este contexto la vulnerabilidad puede interpretarse como una medida de cuán susceptible es un bien, al estar expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador (amenaza). Entre dos (2) bienes uno es más vulnerable que otro si ante la ocurrencia y acción de una determinada amenaza con la misma intensidad, sufre mayores daños que el otro.

Numéricamente la vulnerabilidad tiende a expresarse como un número que puede variar entre 0 y 1, donde un valor de 0 es indicativo de que el daño experimentado por el bien analizado es nulo, mientras que un valor de 1 implica que ese daño es igual al valor del bien que se ha expuesto a la “amenaza”.

La vulnerabilidad suele representarse mediante funciones matemáticas o a través de formas tabulares conocidas como “matrices de vulnerabilidad”, cuya utilización permite la cuantificación del riesgo para cada tipo de elemento que esté sometido a un determinado nivel de riesgo, teniéndose en consecuencia que la función de probabilidad que se vaya a utilizar será

función del tipo de elemento (vivienda, estructuras como refinerías, sub-estaciones eléctricas, hoteles, etc).

En el caso de este trabajo, la amenaza estudiada está representada por el paso de fenómenos meteorológicos por una determinada localización, y el riesgo relacionado a dicha amenaza estaría constituido por la sobre-elevación del nivel del mar asociado al paso del fenómeno meteorológico.

En base a estas premisas y a una determinada función de vulnerabilidad se puede hacer la evaluación del riesgo y generar en última instancia “mapas de peligro” para la amenaza estudiada.

A manera de ejemplo, en la Figura 11-36 se presenta la función de vulnerabilidad para viviendas tipo II (viviendas típicas de clase baja, construidas sin elementos estructurales) de acuerdo con los criterios definidos por el Cenapred (2006) y dado que cada profundidad de inundación debido al aumento del nivel del mar está asociada a un evento de determinada intensidad (I) como los mostrados en la Tabla 11-6, es decir, depresiones y tormentas tropicales o huracanes de cualquier grado, y éstos a su vez están asociados a un % de vulnerabilidad, se puede calcular el riesgo asociado a cada intensidad.

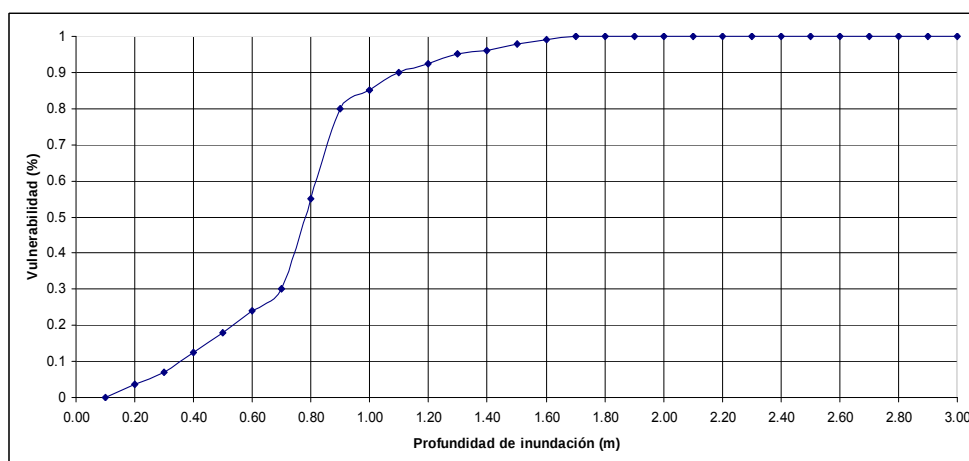


Figura 11-36. Función de vulnerabilidad ante una inundación para una vivienda tipo II.

Si se define, a manera de ejemplo que el % de vulnerabilidad asociado a cada evento de intensidad (i) viene dado por lo presentado en la Tabla 11-8, se puede calcular el riesgo ante el próximo evento (fenómeno meteorológico).

Tabla 11-8. Función de vulnerabilidad asociada a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos de diversa intensidad.

Intensidad i	$V(i)$
1	0.00
2	0.005
3	0.01
4	0.06
5	0.18
6	0.52
7	0.72

Por lo tanto, el riesgo ante el próximo evento se define como la sumatoria de los riesgos asociados a los diferentes niveles de intensidad de los fenómenos (amenazas) estudiados.

Si se expresa el riesgo como:

$$R = C.P.V \quad (11.9)$$

donde C es el valor de los bienes expuestos, P es el peligro y V la vulnerabilidad, se puede calcular el riesgo de ocurrencia de un evento de cierta intensidad, siendo sin embargo preferible para la medición del riesgo, tomar el promedio de daños esperados cuando ocurra un evento, es decir, obtener el riesgo ante el próximo evento, lo cual se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \quad (11.10)$$

y si para efectos prácticos se toma $C = 1$ \$ se tendría que a partir de los datos de peligro $P(i)$ y de vulnerabilidad $V(i)$ presentados en la Tabla 11-6 y Tabla 11-8 respectivamente, se obtiene que:

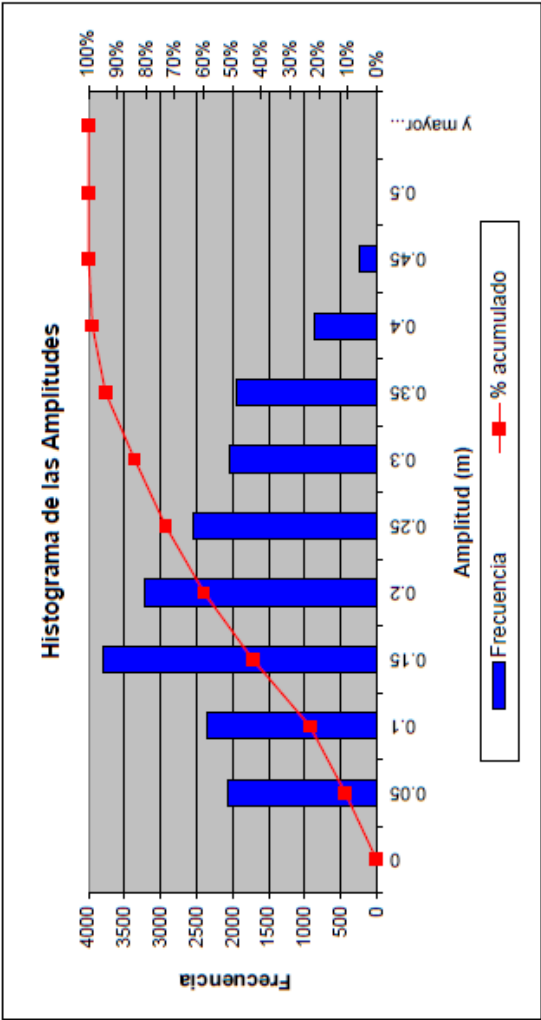
$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) = 0,0759\$$$

Esto significa que para un evento cualquiera, el valor del riesgo será de 0,0759\$ por cada unidad monetaria que tengan los bienes expuestos ante el fenómeno analizado por lo que si se tiene una edificación con un valor estimado de 1 millón de dólares, el riesgo ante un evento cualquiera será de 75900 \$.

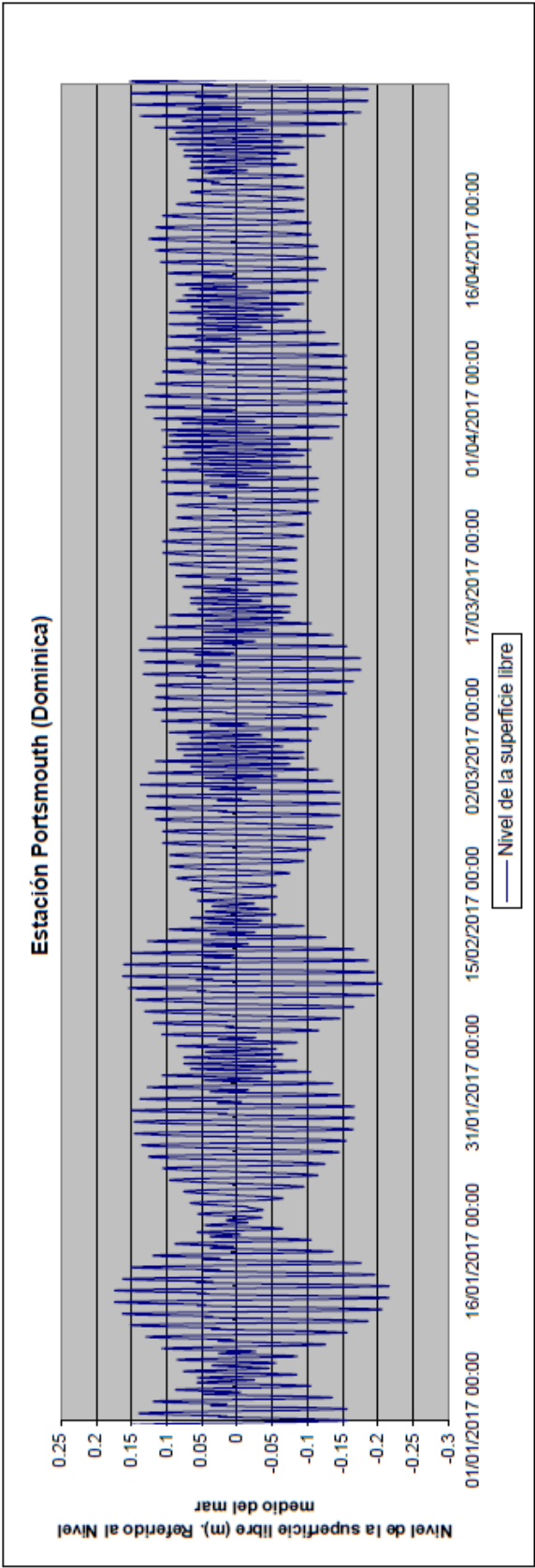
Esta metodología general sirve para estimar los daños (riesgos) asociados a una determinada área ante la acción de una determinada amenaza (fenómeno meteorológico en este caso).

11.7 CARACTERÍSTICAS DEL RÉGIMEN DE MAREAS EN EL ÁREA DE ISLA DE AVES.

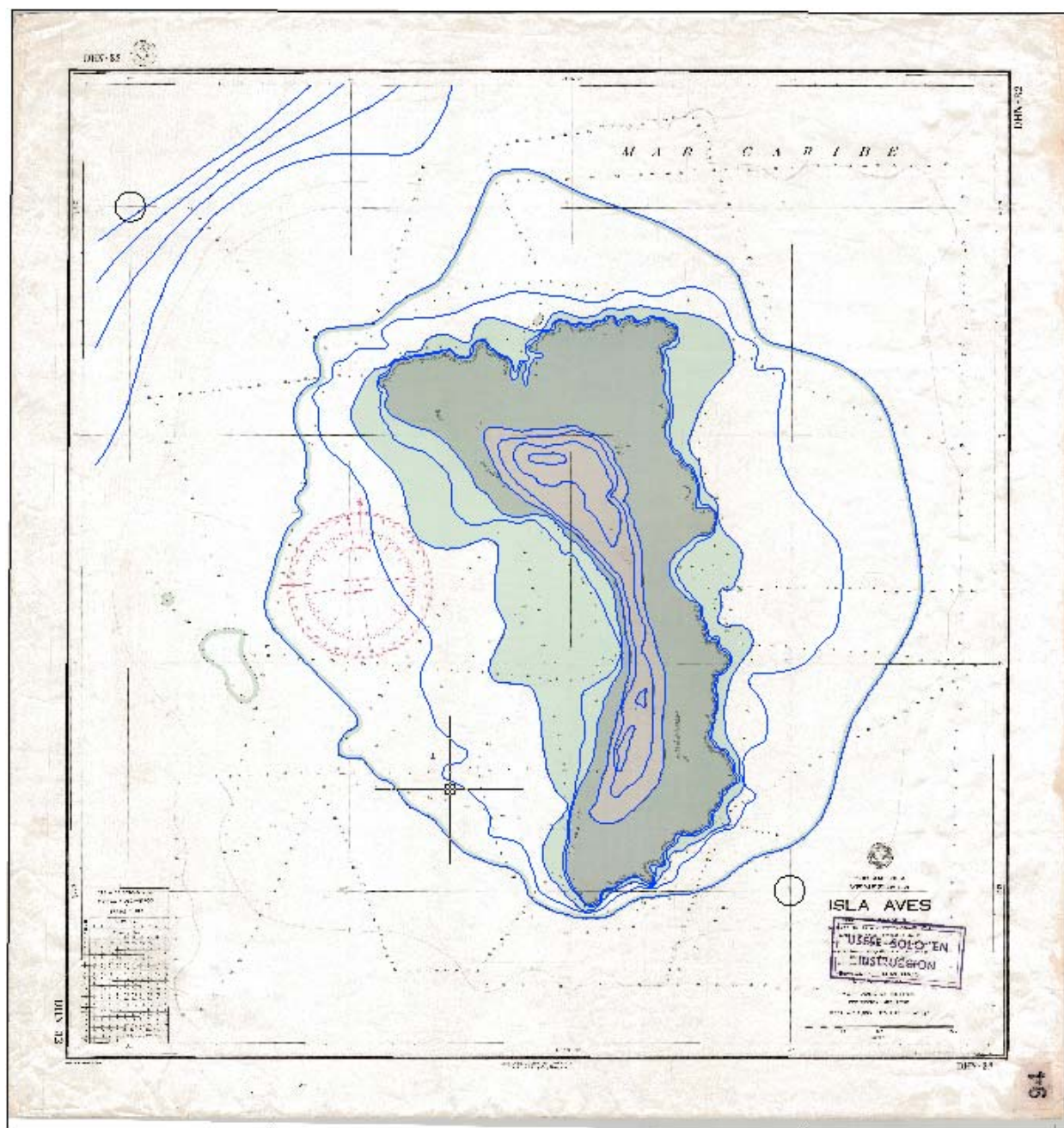
Histogramas de amplitudes de marea. Estación Portsmouth (Dominica)



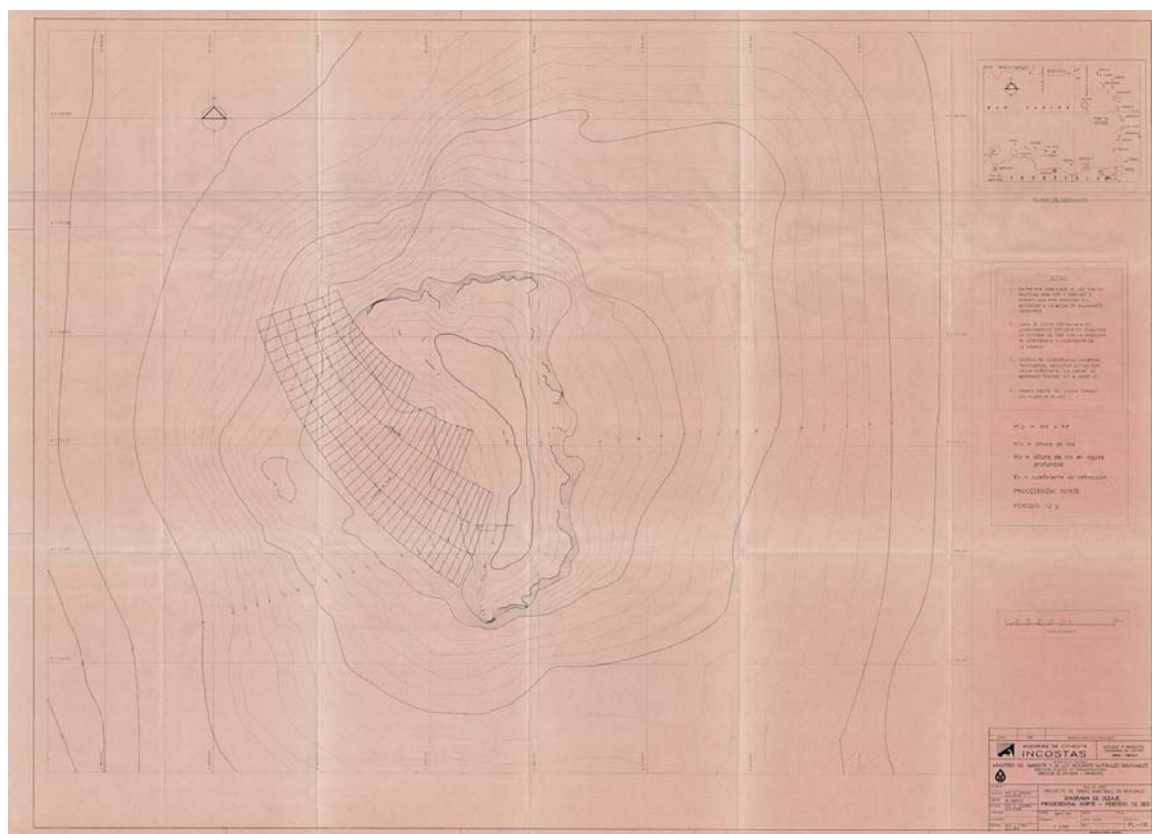
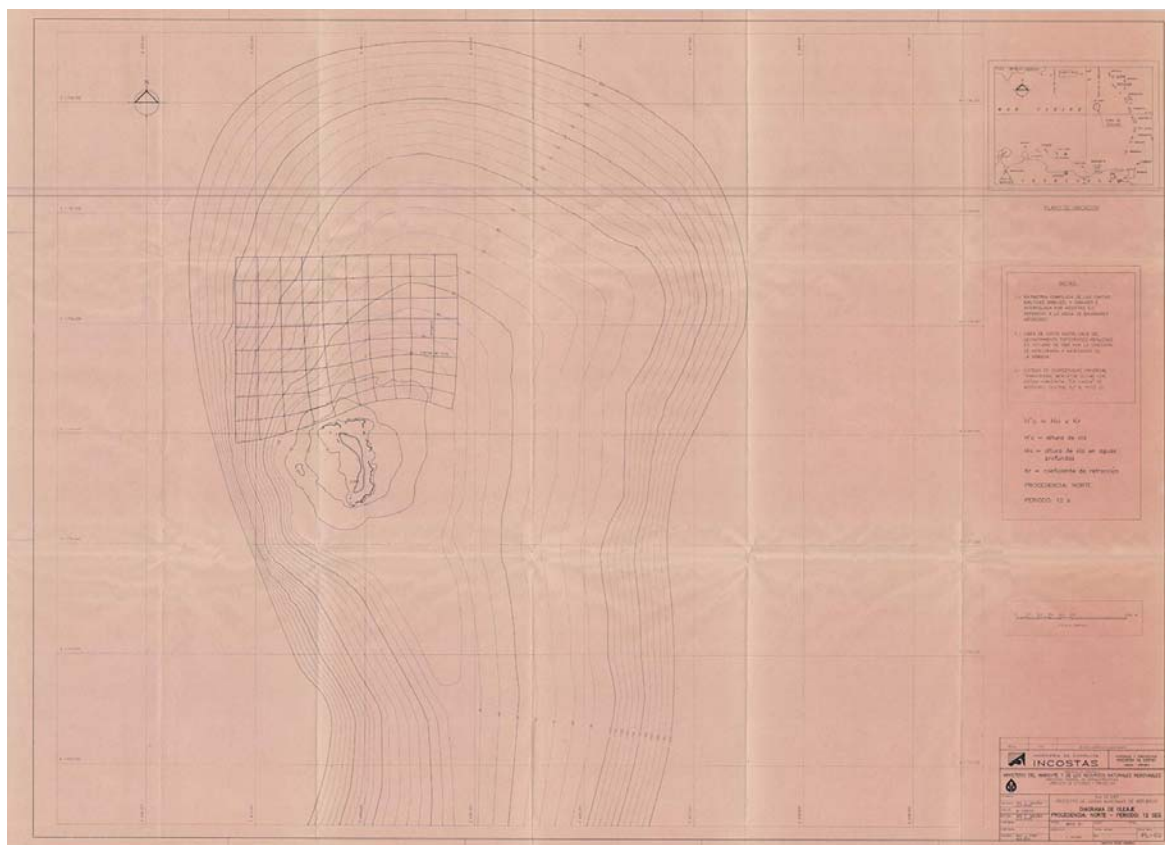
Amplitud (m)	Frecuencia	% acumulado
0	0	0.00%
0.05	2071	10.84%
0.1	2354	23.16%
0.15	3801	43.05%
0.2	3229	59.95%
0.25	2557	73.33%
0.3	2042	84.01%
0.35	1942	94.18%
0.4	867	98.71%
0.45	246	100.00%
0.5	0	100.00%
y mayor...	0	100.00%



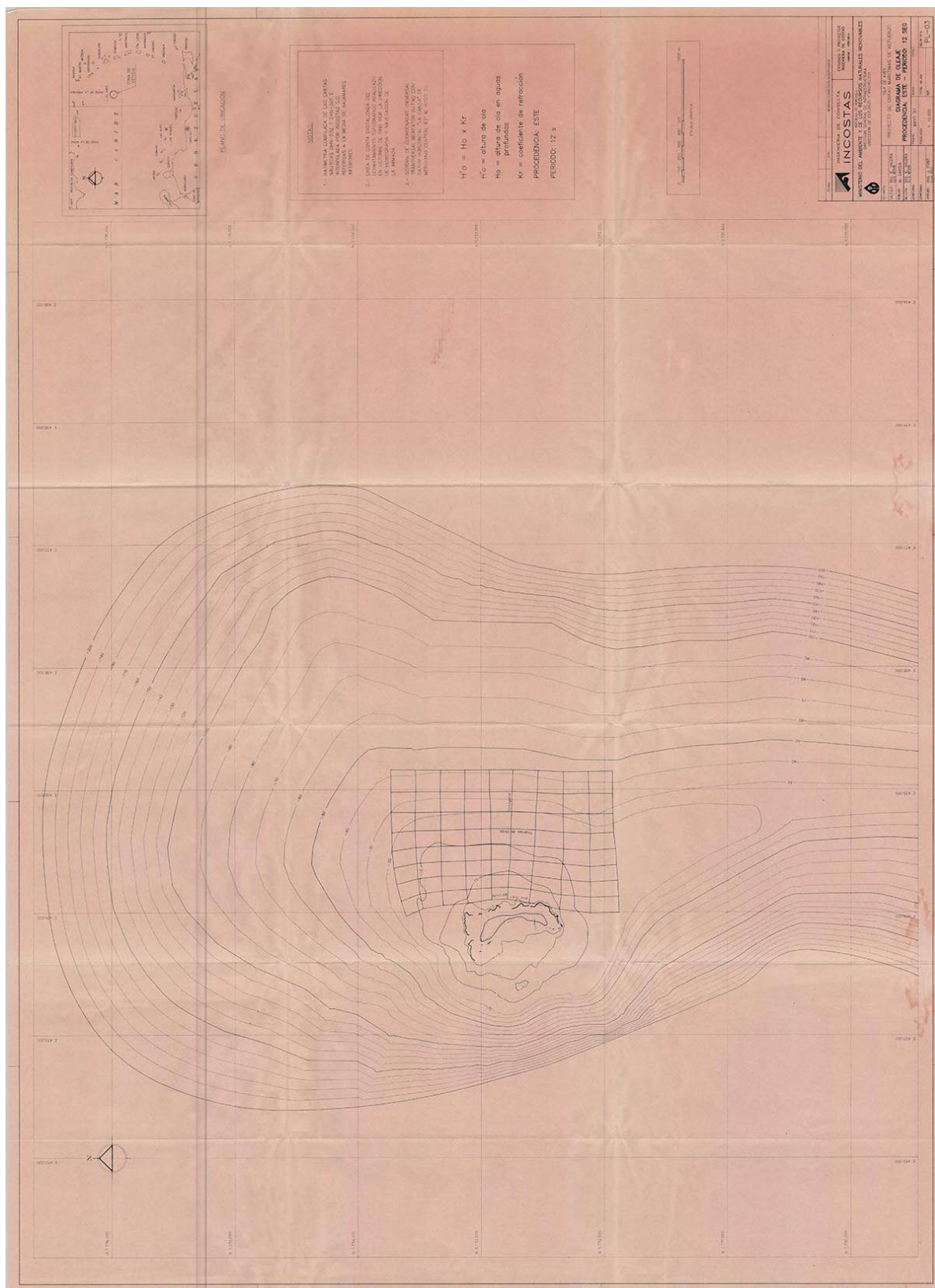
11.8 BATIMETRÍA DE ISLA DE AVES Y PLANOS DE REFRACCIÓN DEL OLEAJE



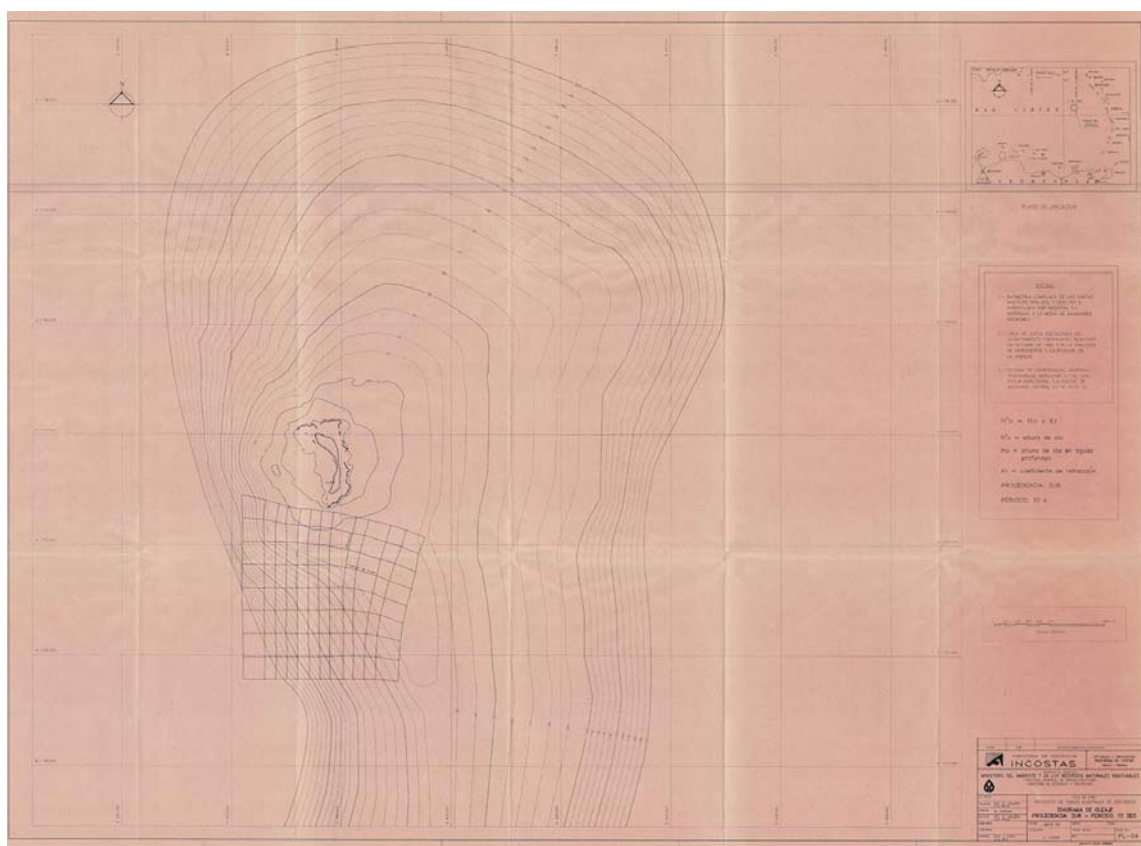
Batimetría general de isla de Aves (Carta Náutica DHN-032, 1970).



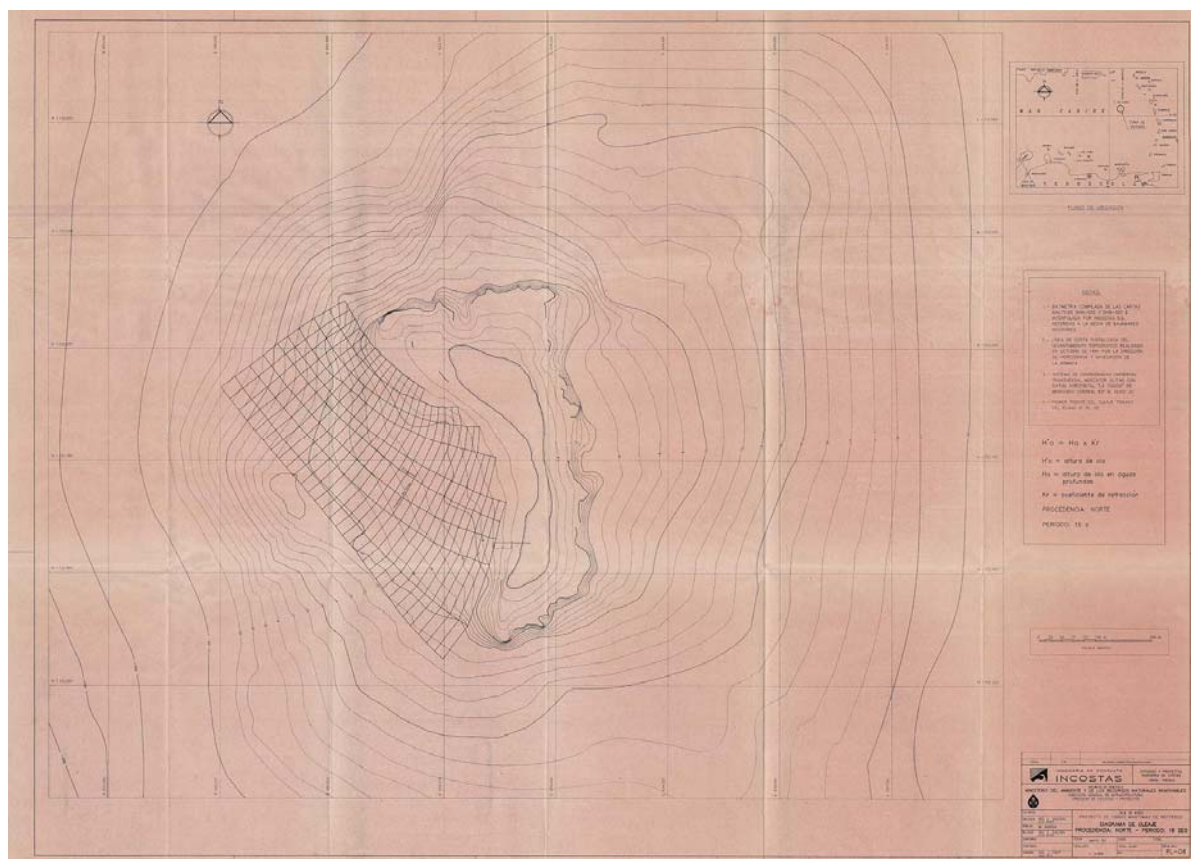
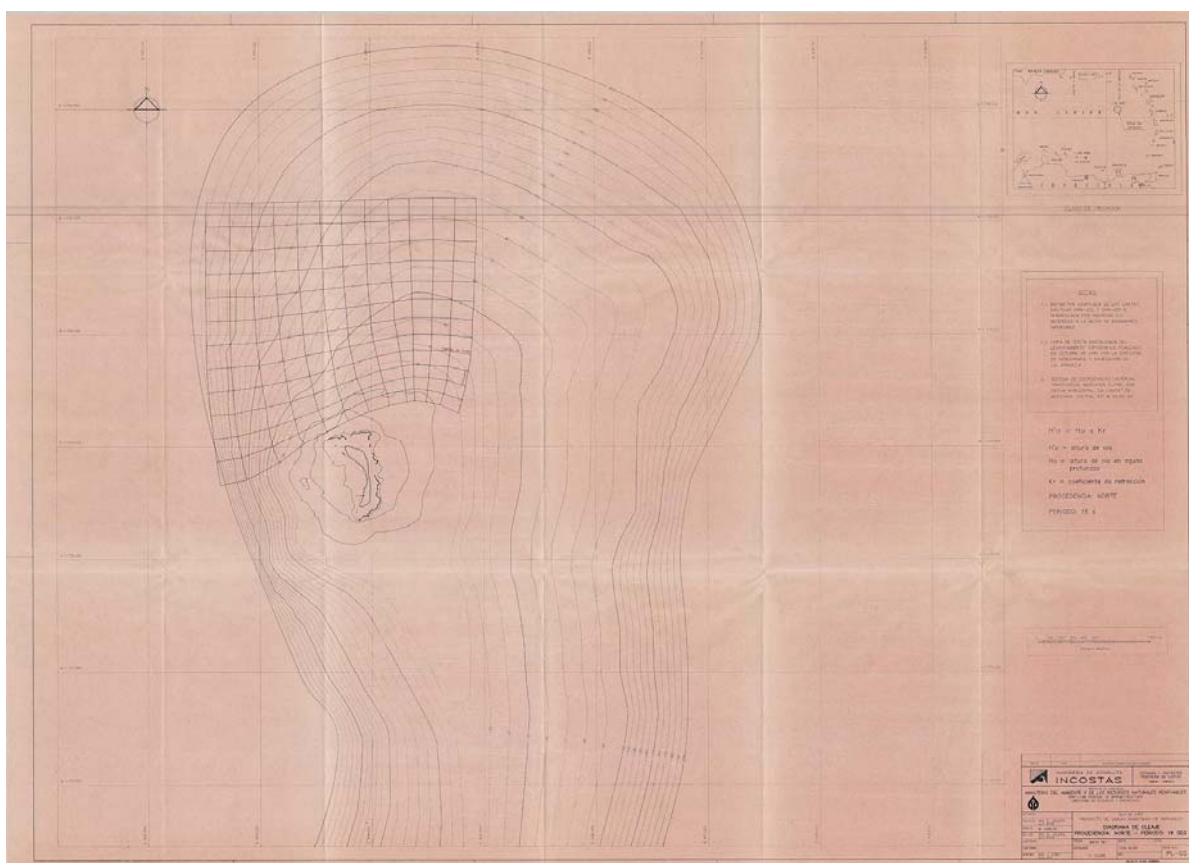
Plano de refracción del oleaje. Procedencia Norte. Período 12 segundos.



Plano de refracción del oleaje. Procedencia Este. Período 12 segundos.



Plano de refracción del oleaje. Procedencia Sur. Período 10 segundos.



Plano de refracción del oleaje. Procedencia Norte. Período 16 segundos.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aceituno P. y Montesinos A. (1992): "Análisis de la estabilidad de la relación entre la Oscilación Sur y la precipitación en América del Sur. Proceedings of International Symposium in Paleo ENSO Records, pp. 7-13.

Amarasekera K, Lee R.F. y Williams E.R: (1997) "ENSO and the natural variability in the flow of the tropical rivers". Journal of Hydrology, 200: 24-39.

Araya, R. (2004): "El fenómeno El Niño y su influencia en el clima". Revista chilena de ingeniería, Vol. 433.

Bécemberg, R (2013): "El niño oscilación sur (ENOS) y su relación con los huracanes en el Atlántico y con la conformación de éstos como potenciales amenazas para las costas venezolanas). Trabajo de ascenso a profesor agregado. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Bjerknes, V. (1904): "Das problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik". Meteor. Zeitschrift, 21, pp 1-7.

Bjerknes, J. (1966): "A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature". Tellus, 18, pp. 820-829.

Bjerknes, J. (1969): "Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific". Monthly Weather Review, 97, pp. 163-172.

Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2006: "Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos". Fenómenos hidrometeorológicos. Capítulo II.

Chavasse D, y Seoane R. (2009): "Assessing and predicting the impact of El Niño Southern Oscillation (ENSO) events on runoff from the Chopin River basin, Brasil". Hydrological Processes, 23:3261-3266.

Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. and Wooworth, P.L. (2001): "Changes in sea level, in Climate Change 2001: The Scientific Basis". Eds. J.T Houghton et al., 639-694m Cambridge Univ. Press, New York.

Conner, W.C et al (1957): "Empirical methods for forecasting the maximum storm tide due hurricanes and other tropical storms". Mon. Wea. Rev., 85, 113-116.

Dean R.G, and Dalrymple R.A, (1991): "Water wave mechanics for engineers and scientists". Prentice-Hall, Inc.

Deser, C. y Wallace, J.M. (1987): "El Niño events and their relation to the Southern Oscillation." 1925-1986. J. Geophys. Res., 92, 14189-14196.

Dirección de Geografía y Cartografía de las Fuerzas Armadas (DIGECAFA) y la Oficina Coordinadora de Hidrografía y Navegación (OCHINA). "Isla de Aves Bastión Venezolano en el mar Caribe". Caracas, 2002. Pág. 3.

EIRD (Estrategia Internacional para Reducción de Desastres 2004: "Vivir con riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres" presentado para Naciones Unidas, Versión 2004, Volumen II Anexos.

Foreman M.G.G. (1977): "Manual for tidal heights analysis and prediction". Pacific Marine science report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C.

- García N. y Mechoso C. (2005): "Variability in the discharge of South American rivers and in climate". *Hydrological Sciences*, 50: 459-478.
- Guevara, J.M. (2008): "El ABC de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)". *Terra, Nueva Etapa*, Vol. XXIV, Núm. 35, pp. 85-140.
- Haidvogel, D.B., and Beckmann, A., (1999): "Numerical Ocean Circulation Modeling". World Scientific Publishing Company, 300 pp.
- Harris, L.D (1959): "An interim hurricane storm surge forecasting guide. National Hurricane Research Project 32, U.S. Weather Bureau, Washington, D.C, 23 pp.
- Harris, L.D (1963): "Characteristics of the hurricane storm surge. Technical Paper No. 48. US. Dept. of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C, 135 pp.
- Horel, J.D. y Wallace J.M. (1981): "Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation". *Monthly Weather Review*, 109, pp. 813-829.
- Holton, James R. (1992): "An introduction to Dinamic Meteorology", Academic Press, Third Edition.
- Hopley, David (2011): *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process*. Springer. Holanda, 2011, p. 237.
- Hsu, S.A., D. Braud, and B. Blanchard, (2006: "Rapid estimation of maximum storm surges induced by hurricanes Katrina and Rita in 2005". *NWA Electronic Journal of Operational Meteorology* EJ9.
- Incostas S.C (1997): "Proyecto de obras marítimas de refuerzo, destinados a la conservación, defensa y mejoras del ambiente, isla de Aves", para la División General de Infraestructura del Ministerio del Ambiente.
- Informe País Venezuela 2010, DIPECHO VI: "Reforzando la capacidad de adaptación de comunidades vulnerables en áreas de alto riesgo en los estados Mérida y Vargas, Venezuela".
- IRI (2007): "Overview of the ENSO system: Monitoring. Documento en línea. Disponible en: <http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/background/monitoring.html>.
- Jelesnianski, C.P., (1972): "SPLASH (Special Program to list Amplitudes of Surges From Hurricanes): Landfall Storms. NOAA Technical Memorandum NWS TDL-46. NWS Systems Development Office, Silver Spring, MD, 56 pp.
- Jelesnianski, C.P., J. Chen and W.A. Shaffer (1992): "SLOSH: Sea, lake and overland surges from hurricanes. NOAA Tech. Report NWS 48, 71 pp.
- Kalnay, E. (2003): "Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability". Cambridge University Press, Cambridge.
- Lezaun, M. (2003): "Predicciones del tiempo y matemáticas", *Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada*, número 22, pp. 59-98.
- Longuett-Higgins, M.S., y Steward, R.W. (1963): "A note on Set-up". *Journal of Marine Research*, vol. 21 (1), pags.

Lazo, Rodrigo (2014): "Historia cartográfica de isla de Aves". Revista Tiempo y Espacio del Centro de Investigaciones Históricas Mario Briceño Iragorry. N° 64, Vol. XXXIII, pág. 582-601.

Lorentz, E.N (1965): "A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. Tellus, (17): págs. 321-333.

Luetlich, R.A., J.J. Westerink, and N.W. Sheffner (1992): "Modeling 3-D circulation using computations for the western North Atlantic and Gulf of Mexico. Estuarine and Coastal Modeling II, M. Spaulding, Ed., ASCE, 632-643.

Marengo, J., et al (2010): "Recent developments on South America monsoon system". International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.2254.

Maturana, J., Bello, M. y Manley, M. (2004): "Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur". Publicación del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), 2004.

Mendez, Baamonde, José (2006): "Isla de Aves: Equilibrio entre la subsidencia, aumento del nivel del mar, acreción y programación". Trabajo de Ascenso. UCV. Caracas. Pág. 44.

National Oceanic and Atmospheric Administration (2005): "Storm surge a "rising" concern among coastal residents. NOAA magazine, Commerce Department (available at <http://www.srh.noaa.gov/stories/mag178.htm>).

Nieves-Croes A., Francisco Javier (2010): "Límites marítimos venezolanos en el mar Caribe y el Océano Atlántico, MPPD, ARBV, Mapoteca digital CJA, Caracas.

NOAA (1): Página Web del National Hurricane Center. <http://www.nhc.noaa.gov/climo/>. Consultado el 03-10-2012.

Pain, C.C., Piggott, M.D., Goddard, A.J., Fang, F., Gorman, G.J., Marshall, D.P., Eaton, M.D., Power, P.W., and De Oliveira, C.R.E. (2005): Three-dimensional unstructured mesh ocean modelling. Ocean modelling 10 (1), 5-33, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.07.005.

Pugh, D.T. (1987): "Tides surges and mean sea level. A handbook for engineers and scientists". Wiley, Chichester, 472 pp.

Quinn, W.H. y Neal, V.T. (1992): "The historical record of the Niño events". Bradley, R.S y Jones P.D (eds): "Climate Since A.D. 1500". Routledge, Chapman and Hall. London. (pp. 623-648).

Rasmusson, E.M. y Carpenter, T.H. (1982): "Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. Monthly Weather Review, 110, pp. 354-384.

Rasmusson, E.M. y Carpenter, T.H. (1983): "The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka". Monthly Weather Review, 111, pp. 517-528.

Richardson, L.F. (1922): "Weather Prediction by Numerical Process". Cambridge University Press, reprinted Dover, 1965.

Ropelewsky, C. y Halpert, M. (1987): "Global and Regional Scale Precipitation Pattern associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115: 1606-1626.

Seinfeld, J. y Pandis, S. (1998): "Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change". J. Wiley and Sons, Inc.

Simpson, J., Brier, G W., and Simpson, R. H. (1967): "Stormfury cumulus seeding experiments 1965: Statistical analysis and main results". *J. Atmos. Sci.* 24, 508-521.

Schongart, J. y Junk, W. (2007): "Forecasting the flood pulse in Central Amazonia by ENSO indices". *Journal of Hydrology*, 335: 124-132.

Sheets, R. (1990): "The National Hurricane Center. Past, Present and Future". *Weather and Forecasting*. Vol. 5, No 2, pp. 185-231.

Thompson, P. (1961): "Numerical Weather Analysis and Prediction. New York: The Macmillan Company.

Tobler, W. (1979): "Lattice Tuning" Cellular Geography". *Journal of Geographical Analysis*. Vol. 11, pag. 36-44.

UNDRO (1979): "Natural Disasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts Group Meeting, Geneva, July 1979.

Valiente, O. (1999): "Evolución en el estudio del fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur): de anomalía local a la predicción de variables climáticas locales". *Anales de la Universidad de Alicante. Instituto Universitario de Geografía*.

Vecchi, G., y Knutson, T. (2008): "On estimates of historical North Atlantic Tropical Cyclone Activity". *Journal of Climate*, Volumen 21, pp. 3580-3600.

Weggel, J.R. (1972): "Maximum Breaker Height". *Proceeding of ASCE-Journal of the Waterways. Harbors and Coastal Engineering Division*, vol. 98-ww4.

Yarnal, B. (1985): "Extratropical teleconnections with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events". *Progress in Physical Geography*, 9, pp. 315-352.

Yarnal, B. y Kiladis, G. (1985): "Tropical teleconnections associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events. *Progress in Physical Geography*, 9, pp. 524-556.