

Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2

CO-T3812-002

Análisis de Riesgo de Línea Base

(Entregable 2)

Anexo 1: Evaluación del Riesgo por Huracanes

Preparado para:



COLOMBIA
INTEGRO DE LA
VIDA



Ambiente



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Enero de 2024

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Cardona, Omar-Darío; Bernal, Gabriel A.; Villegas, Claudia P.; González, Diana M.; Rincón, David F.; Molina, John F.; Grajales, Sthefania; Herrera, Sergio A.; Acosta, Mariana; Suárez, Dora C.; Pérez, Maria del Pilar; Marulanda, Paula M.; Marulanda, Mabel C. (2024). Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2, Análisis de Riesgo de Línea Base – A.1 Evaluación del Riesgo por Huracanes. Banco Interamericano de Desarrollo, Minambiente de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR HURACÁN	6
2.1 TRAYECTORIAS HISTÓRICAS EN EL CARIBE COLOMBIANO.....	6
2.2 TRAYECTORIAS SIMULADAS CON CAMBIO CLIMÁTICO	8
2.3 PERTURBACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS HURACANES.....	8
2.4 MODELACIÓN DEL CAMPO DE VIENTO	9
2.4.1 CAMPO DE VIENTO DE GRADIENTE	9
2.4.2 VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL VIENTO	11
2.4.3 MODIFICADORES DE SITIO	12
2.4.4 FACTOR DE RÁFAGA.....	15
2.4.5 CAMPO DE VIENTO SUPERFICIAL	16
2.4.6 AMENAZA POR VIENTO HURACANADO	17
2.5 MODELACIÓN DE LA MAREA DE TORMENTA.....	18
3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	21
3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES.....	21
3.1.1 CENSO NACIONAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA	21
3.1.2 INFORMACIÓN CATASTRAL.....	24
3.1.3 GOOGLE OPEN BUILDINGS	25
3.1.4 GLOBAL HUMAN SETTLEMENT (GHS) BUILDING HEIGHT.....	26
3.2 CONFORMACIÓN DEL MODELO DE EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	27
3.2.1 GEORREFERENCIACIÓN.....	28
3.2.2 NÚMERO DE PISOS	29
3.2.3 SECTOR DE USO	30
3.2.4 CATEGORÍA SOCIOECONÓMICA.....	30
3.2.5 SISTEMA ESTRUCTURAL	32
3.2.6 VALORACIÓN ECONÓMICA.....	33
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	34
4 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	46
4.1 MODELO PROBABILISTA DE LA PÉRDIDA.....	46
4.2 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD	49

4.3	TIPOLOGÍAS CONSIDERADAS	50
4.4	VULNERABILIDAD AL VIENTO.....	51
4.5	VULNERABILIDAD A LA MAREA DE TORMENTA.....	52
5	<u>EVALUACIÓN DEL RIESGO</u>	<u>55</u>
5.1	MÉTRICAS DEL RIESGO.....	56
5.1.1	LA PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	56
5.1.2	LA PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	57
5.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	57
6	<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>70</u>

1 INTRODUCCIÓN

Históricamente los huracanes no han sido vistos como una amenaza significativa para el país, debido a la relativa baja recurrencia de sus efectos. No obstante, el territorio colombiano no es ajeno al impacto de los huracanes.

El 17 de octubre de 1988, el huracán Joan atravesó la península de La Guajira, aún como tormenta tropical, dejando más de cinco mil personas damnificadas, especialmente en los municipios de Manaure y Uribia. Riohacha sufrió fuertes inundaciones a causa del exceso de precipitación. Cuatro días después, Joan impactaría la isla de San Andrés, transitando a 88 kilómetros al sur como huracán de categoría 4, causando en la isla vientos de hasta 100 Km/h y precipitaciones que alcanzaron los 300 mm/día.

Así mismo, el 13 de noviembre de 2020 se forma al noreste de Colombia la tormenta tropical Iota, siendo clasificada como Huracán Categoría 1 el 15 de noviembre por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos, llegando a ser Categoría 4 tan solo un día después, momento en el cual impacta con mayor fuerza el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, causando velocidades de viento sostenidas en 3 segundos del orden de 320 Km/h¹ y destrucción sin precedentes en la historia del país, especialmente en la isla de Providencia.

Como se resume en la Tabla 1, la modelación del riesgo por huracán se concentró en municipios al norte de Colombia, en los departamentos de la Guajira y el Archipiélago de San Andrés y Providencia, los cuales se encuentran en la zona del territorio que es susceptible al tránsito de huracanes. Los municipios incluidos en la evaluación detallada son Riohacha, Manaure y Uribia en La Guajira, y San Andrés y providencia, en el Archipiélago.

Tabla 1. Municipios seleccionados para la evaluación

Departamento	Municipios
Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	<ul style="list-style-type: none">• San Andrés• Providencia
La Guajira	<ul style="list-style-type: none">• Uribia• Manaure• Riohacha

Como se menciona, para considerar el cambio climático se incluyeron las trayectorias simuladas por Bloemendaal et al. (2020) al 2050, obtenidas de su modelo STORM, en donde se consideran las proyecciones de 5 modelos de circulación global (GCM)², los cuales son los únicos que, a la fecha, cuentan con la resolución espacial y temporal para aproximar procesos de mesoescala meteorológica.

¹ La velocidad de viento reportada en los boletines meteorológicos de huracanes es promediada en 1 minuto, variable con la cual se establece la Categoría Saffir-Simpson del ciclón. En el momento en que Iota impacta el Archipiélago siendo ciclón Categoría 4, presenta velocidades máximas sostenidas en un minuto de alrededor de 250 Km/h, lo que corresponde a velocidades de ráfaga de 3 segundos de alrededor de 320 Km/h.

² Estos modelos son: CMCC-CM2-VHRA, CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, y HadGEM3-GC31-HR, todos ellos tomados del PRIMAVERA High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP), que es un subproyecto del Climate Model Intercomparison Project 6 (CMIP6), en el cual fundamenta sus conclusiones el reporte AR6 del IPCC.

2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR HURACÁN

La evaluación de la amenaza por ciclones tropicales se realizó siguiendo un enfoque metodológico basado en eventos, a partir de la simulación de múltiples trayectorias de huracanes. Esta metodología es ampliamente aceptada a nivel internacional para la evaluación de la amenaza con fines de cálculo del riesgo (Vickery et al., 2009a). Una evaluación basada en eventos permite crear un conjunto de huracanes sintéticos, totalmente compatibles con las características físicas de los ciclones observados en la historia, pero que no necesariamente han ocurrido aún. La intensidad de cálculo para el campo de viento fuerte es la velocidad de ráfagas de 3 segundos a 10 metros de la superficie (v_{10}). Para la marea de tormenta en las costas, se calcula la sobreelevación del mar (η). Para cada evento simulado se calcula el campo de viento y la marea de tormenta incidente sobre el territorio, expresado como la distribución de probabilidad de la intensidad local. Todos los cálculos fueron realizados en el software TCHM (Bernal, 2013).

2.1 Trayectorias históricas en el Caribe colombiano

Las trayectorias de los huracanes se componen de avisos, los cuales se dan cada 6 horas e indican: fecha y hora del aviso, ubicación geográfica del centro del ciclón, presión central y velocidad del viento sostenida en 1 minuto a 10 metros sobre la superficie del mar. Estos avisos son usualmente emitidos por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos para toda la cuenca del Atlántico Norte. La Figura 1 muestra la trayectoria, con sus diferentes avisos, del huracán Iota (noviembre de 2020).










Figura 1. Trayectoria y avisos del huracán Iota

Con el valor de presión central en cada aviso, o la velocidad sostenida en 1 minuto, se calcula la categoría Saffir-Simpson del huracán, presentada en la Tabla 2. Con fines ilustrativos, se incluye en la Tabla 2 la velocidad de ráfaga estimada en 3 segundos (no hace parte de la escala original). Las trayectorias históricas para esta evaluación fueron obtenidas de la base de datos IBTrACS³, mantenida por la Agencia Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA) de los Estados Unidos, y considerada la mejor fuente de información

³ International Best Track Archive for Climate Stewardship. <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>

de trayectorias ciclónicas en el mundo. La Figura 2 muestra la distribución de trayectorias, con sus correspondientes categorías Saffir-Simpson por segmento, en el mar Caribe al norte de Colombia.

Tabla 2. Escala de huracanes Saffir-Simpson (DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta Tropical)

Categoría		Velocidad sostenida en 1 minuto (km/h)	Presión central (hPa)	Velocidad aproximada sostenida en 3 segundos (km/h)
	DT	<60	990-1000	<78
	TT	60-120	980-990	78-156
	1	120-150	970-980	156-195
	2	150-180	965-970	195-234
	3	180-210	945-965	234-273
	4	210-250	920-945	273-325
	5	>250	<920	>325

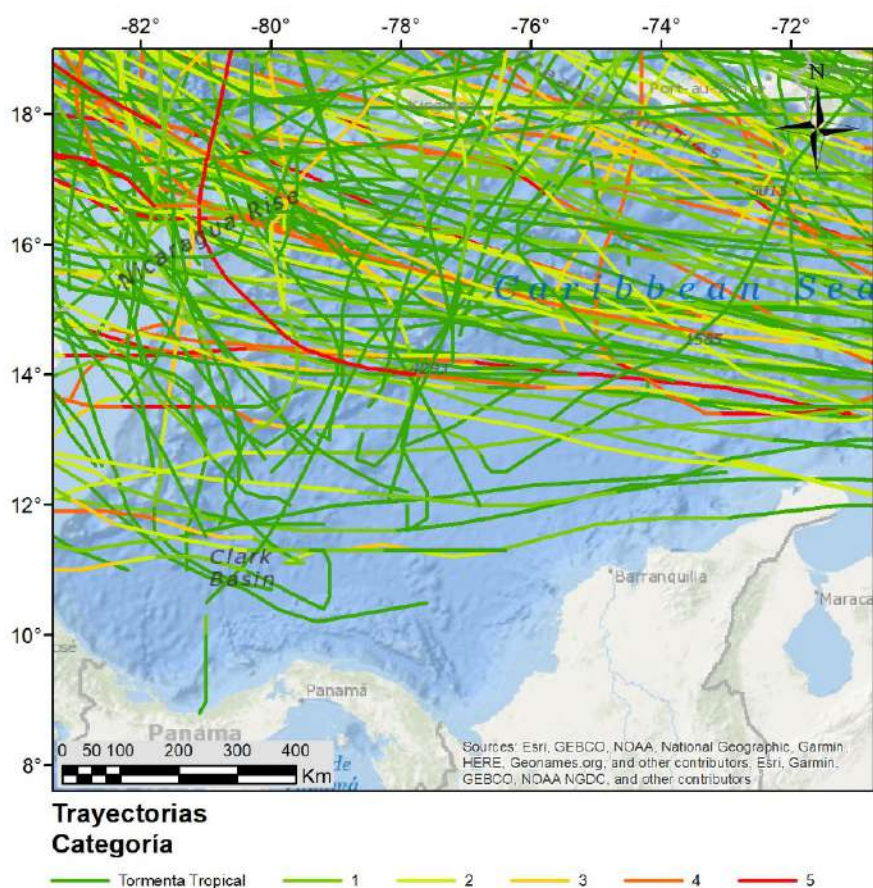


Figura 2. Trayectorias históricas en el mar Caribe al norte de Colombia

2.2 Trayectorias simuladas con cambio climático

Con el fin de incorporar la perturbación causada por el cambio climático en la ciclogénesis, así como en la vida de las tormentas, es necesario incluir proyecciones obtenidas de modelos de circulación global sobre las variables que tienen incidencia en la formación y avance de los ciclones tropicales. Con este fin, el catálogo de huracanes incluido al 2050 se compone de registros todos históricos tomados de IBTrACS, complementado con una muestra representativa del conjunto de datos STORM desarrollado por Bloemendaal et al. (2020). Este conjunto de datos proporciona 10.000 años equivalentes de trayectorias simuladas, desarrolladas a partir de un modelo estocástico de las principales características que determinan la trayectoria de los ciclones tropicales, como la presión central, la velocidad y dirección de avance, la ubicación de la génesis, la temperatura de la superficie del mar, la presión media al nivel del mar, entre otras. Bloemendaal et al. (2020) incluyeron en su modelo STORM las proyecciones de 5 modelos de circulación global (GCM), los cuales son los únicos que, a la fecha, cuentan con la resolución espacial y temporal para aproximar procesos de mesoescala meteorológica. Estos modelos son: CMCC-CM2-VHRA, CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, y HadGEM3-GC31-HM, todos ellos tomados del PRIMAVERA High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP), que es un subproyecto del Climate Model Intercomparison Project 6 (CMIP6), en el cual fundamenta sus conclusiones el reporte AR6 del IPCC. Las trayectorias futuras han sido determinadas usando STORM, a partir de las proyecciones de los modelos GCM mencionados, en todos los casos considerando una trayectoria de emisiones RCP8.5, siendo esta la única trayectoria incluida en esta evaluación. En la actualidad no se cuenta proyecciones compatibles con este mismo nivel de refinamiento para otras trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.3 Perturbación de las trayectorias de los huracanes

Para cada trayectoria de huracán, histórico o simulado con clima futuro, se genera un conjunto de trayectorias “hijas” siguiendo un proceso bidimensional de Wiener en el cual la trayectoria histórica es perturbada artificialmente para crear una nueva trayectoria hija. Este proceso de perturbación es presentado en la ecuación 1:

$$\mathbf{x}_s(t_{k+1}) = \mathbf{x}_s(t_k) + \Delta \mathbf{X}_{k,k+1} + e \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde $\mathbf{x}_s(t_k)$ es el vector de posición de un punto de la trayectoria en el instante t_k , $\mathbf{x}_s(t_{k+1})$ es el vector de posición en el siguiente punto de la trayectoria registrado en el instante t_{k+1} , $\Delta \mathbf{X}_{k,k+1}$ es el delta entre el instante k y $k + 1$, y e es una variable aleatoria que sigue una distribución normal con $\mu=0.0$ y $\sigma=0.5$.

Los valores de presión central de las trayectorias simuladas se establecen inicialmente como iguales a los del huracán original, y luego son modificados de acuerdo con el modelo de balance propuesto por Emanuel (2006) considerando los parámetros del sistema atmosférico-oceánico que influyen en el ciclo de vida de un huracán, garantizando así la consistencia física de los valores simulados. Este procedimiento permite ampliar artificialmente el catálogo de huracanes en la región de cálculo, permitiendo así la simulación de trayectorias adicionales no incluidas en el catálogo original. En esta evaluación, se simulaban 100 trayectorias hijas por cada trayectoria histórica.

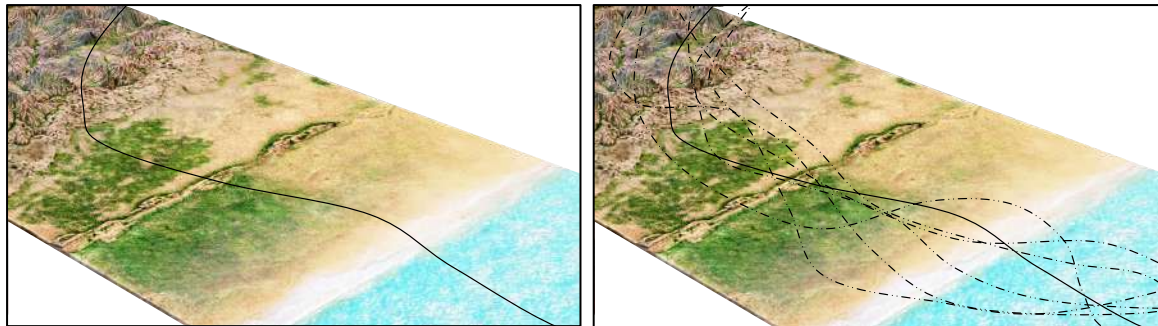


Figura 3. Ilustración de la perturbación de trayectorias sobre un territorio hipotético. De la trayectoria original (izq.) se obtiene una familia de trayectorias perturbadas (der.)

2.4 Modelación del campo de viento

La modelación del campo de viento es un proceso de tres pasos (Vickery et al., 2009a):

1. A partir de la presión central del huracán, se calcula la velocidad del viento de gradiente. La velocidad gradiente es la velocidad que resulta de asumir que el principal mecanismo que causa las corrientes de viento es el gradiente de presión. Los efectos del rozamiento superficial, así como los efectos no lineales del rozamiento entre capas de aire son despreciados en este punto.
2. Por medio de un modelo de capa límite planetaria, se calcula el perfil de velocidades en función de la rugosidad de la superficie, y el valor básico de velocidad de viento promediado en una hora a 10 metros de la superficie del terreno. En este punto, los efectos no lineales de rozamiento se incorporan como un campo de perturbación aleatorio en todo el dominio de evaluación.
3. La velocidad básica promediada en una hora es transformada a velocidad de ráfaga de 3 segundos mediante el cálculo del factor de ráfaga correspondiente. Así mismo, la velocidad resultante es modificada para incorporar el efecto de la topografía.

2.4.1 Campo de viento de gradiente

La velocidad del viento de gradiente (v_G) se calcula en este estudio utilizando el modelo propuesto por Holland (1980):

$$v_G = \sqrt{\left(\frac{RMW}{r}\right)^B \cdot \frac{B \cdot \Delta P \cdot \exp\left(-\left(\frac{RMW}{r}\right)^B\right)}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{f \cdot r}{2}} \quad \text{Ecuación 2}$$

en donde RMW es la distancia a los máximos vientos, r es la distancia de observación (i.e. la distancia del sitio de cálculo al centro de la tormenta), ΔP es el gradiente de presión ($\Delta P = P_n - P_0$, donde P_n es la presión atmosférica nominal establecida como 1005 hPa), ρ es la densidad del aire, f es el parámetro de fuerza de Coriolis ($f = 2\Omega \sin\varphi$, donde Ω es la velocidad de rotación angular de La Tierra, y φ es la latitud del ojo del ciclón) y B es el parámetro adimensional de Holland, el cual es una constante que define la forma del perfil de velocidad gradiente y que toma valores usualmente entre 0.7 y 2.2.

El radio a los máximos vientos (RMW) marca el punto en el cual el perfil de velocidad gradiente es máximo, medido desde el centro del huracán. Existen múltiples propuestas en la literatura para el cálculo de este parámetro. En este estudio se aplica la ecuación empírica propuesta por Vickery & Whadera (2008),

$$RMW = 3.015 - 6.291 \cdot 10^{-5} \Delta P + 0.0337 \varphi \quad \text{Ecuación 3}$$

Para el cálculo del parámetro B de Holland, se emplea la formulación propuesta por Vickery & Wadhwa (2008), quienes encontraron una correlación suficientemente buena entre B y un parámetro adimensional A definido por ellos:

$$B = 1.732 - 2.237 \sqrt{A} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$A = \frac{RMW \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0 \cdot e} \right)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

en donde R_d es la constante de gases del aire, T_s es la temperatura de superficie del mar (dada en °K), y e es la constante de Euler. Con fines ilustrativos, la Figura 4. muestra un campo de viento calculado para un huracán estacionario (i.e. sin velocidad de avance), por medio del modelo de Holland (1980) aquí presentado. El perfil de velocidades que se muestra es simétrico, lo que resulta en un campo de viento con contornos circulares. La velocidad gradiente calculada corresponde a la velocidad sostenida en un tiempo muy largo, por lo que se asocia a un tiempo de una hora.

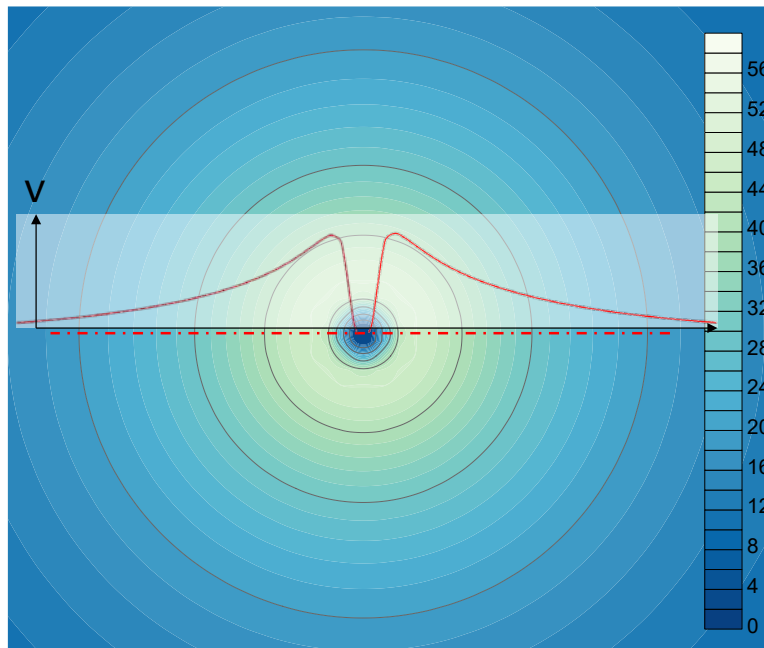


Figura 4. Campo de velocidad gradiente de una tormenta estacionaria con presión central de 950 hPa. El perfil de velocidad presentado es calculado con el modelo de Holland (1980).

2.4.2 Velocidad superficial del viento

La velocidad de gradiente (v_G) es modificada para obtener la velocidad a nivel de superficie del terreno (en realidad a 10 metros sobre la superficie) utilizando un modelo de capa límite plantearía. Vickery et al. (2009b) proponen un modelo de variación de la velocidad media del viento (en una hora), $u(z)$ como función de la altura desde la superficie z , dentro de la capa límite como:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - 0.4 \left(\frac{z}{H^*} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

en donde k el coeficiente de von-Karman ($k = 0.4$), u_* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica y H^* es la altura de la capa límite, la cual puede modelarse de acuerdo con Vickery et al. (2009b) así:

$$H^* = 343.7 + \frac{0.26}{I} \quad \text{Ecuación 7}$$

en donde I es la estabilidad inercial, definida por Kepert (2001) como:

$$I = \sqrt{\left(f + \frac{2V_G}{r} \right) \left(f + \frac{V_G}{r} + \frac{\partial V_G}{\partial r} \right)} \quad \text{Ecuación 8}$$

La velocidad de fricción, u_* , se define como:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{Ecuación 9}$$

en donde τ es el cortante superficial del viento, definido como:

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot u^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

en donde C_d es el coeficiente de arrastre, y u es la velocidad del viento en superficie. La aplicación de este modelo de capa límite resulta en perfiles logarítmicos de variación de la velocidad sostenida en un minuto con la altura desde la superficie, los cuales han sido ampliamente validados con respecto a valores registrados en sondas de caída libre lanzadas sobre ciclones tropicales desde vuelos de reconocimiento (mayores detalles en Vickery et. al. 2009b). La Figura 5 muestra tres perfiles de velocidad calculados para diferentes distancias desde el centro de un ciclón con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

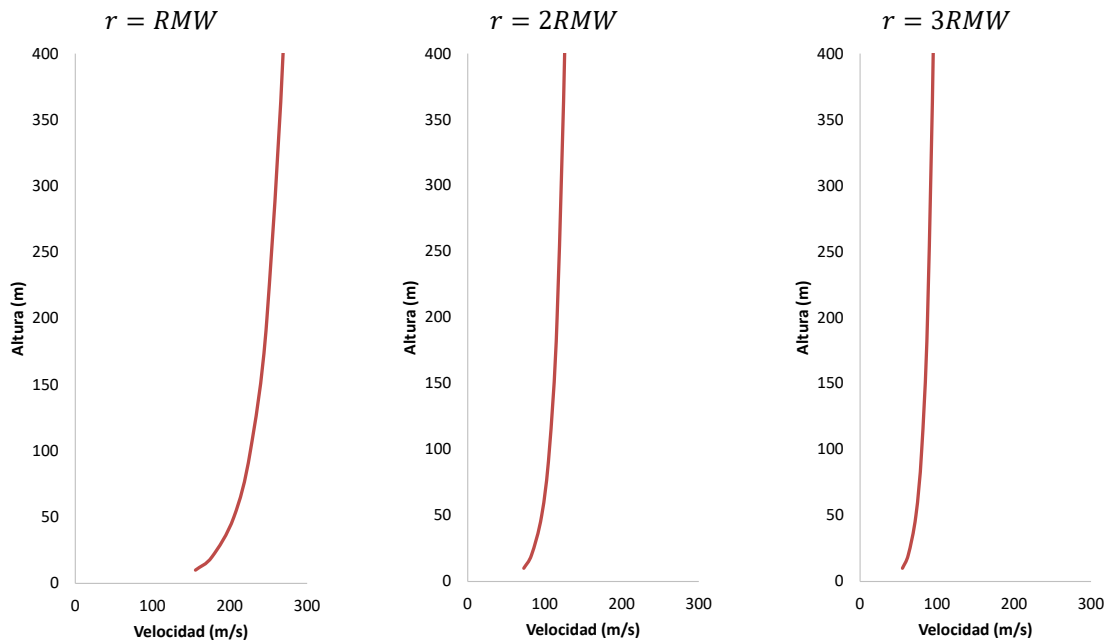


Figura 5. Perfiles de velocidad logarítmicos calculado a diferentes distancias del centro de la tormenta para un huracán con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

2.4.3 Modificadores de sitio

Las condiciones locales modifican el valor de la velocidad del viento superficial en cada ubicación geográfica. Los principales modificadores son la rugosidad de la superficie y el efecto topográfico.

2.4.3.1 Rugosidad de la superficie

La rugosidad superficial está asociada con el tamaño y densidad de obstáculos al flujo de viento, los cuales inducen flujo turbulento a nivel local, reduciendo la magnitud de la velocidad superficial. La rugosidad de la superficie es directamente incorporada en el modelo de capa límite por medio de los parámetros z_0 (longitud de rugosidad aerodinámica) y C_d (coeficiente de arrastre), cuya modificación tiene un efecto en el perfil logarítmico del viento como se ilustra en la Figura 6.

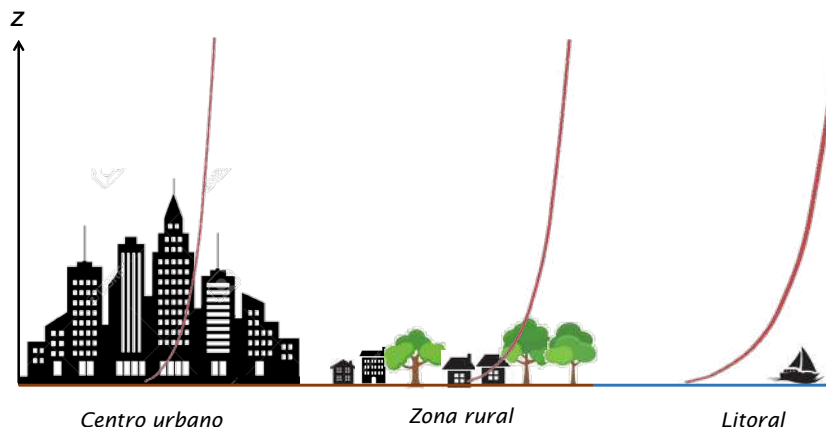


Figura 6. Ilustración del cambio inducido en el perfil logarítmico del modelo de capa límite por cuenta de la rugosidad superficial.

2.4.3.2 Efecto topográfico

El efecto topográfico describe las modificaciones causadas a la velocidad superficial del viento por cuenta de la existencia de escarpes o promontorios. Este efecto cambia el carácter logarítmico del perfil de velocidad del modelo de capa límite. En la actualidad no existen aproximaciones analíticas cerradas para la modelación del perfil de velocidad de capa límite alterado por topografía. En la práctica, el efecto se determina por medio de la definición del factor de topografía K_{zt} el cual establece el valor por el cual se multiplica la velocidad superficial para incorporar el efecto topográfico.



Figura 7. Ilustración del efecto topográfico

En este trabajo, el efecto topográfico es evaluado a través de la identificación de áreas protegidas y expuestas al viento en un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM empleado fue obtenido de la base

de datos de elevación topográfica ASTER⁴ de la NASA. Para cada sitio (X, Y) en el DEM, se busca un sitio (K, L) hasta que falle la siguiente condición:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde Z_{Lim} es la diferencia de altura requerida entre los sitios (X, Y) y (K, L) para obtener una pendiente m , la cual se establece previamente como pendiente de referencia.

Si el sitio (K, L) existe, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de baja exposición al viento. De lo contrario se calcula la pendiente topográfica media (m_T) entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L),

$$m_T = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad \text{Ecuación 12}$$

en donde D es la distancia entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L). Si $|m_T| \leq m$, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de exposición normal. Finalmente, si $|m_T| \geq m$ entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de alta exposición. Las condiciones indicadas anteriormente se ilustran en la Figura 8. .

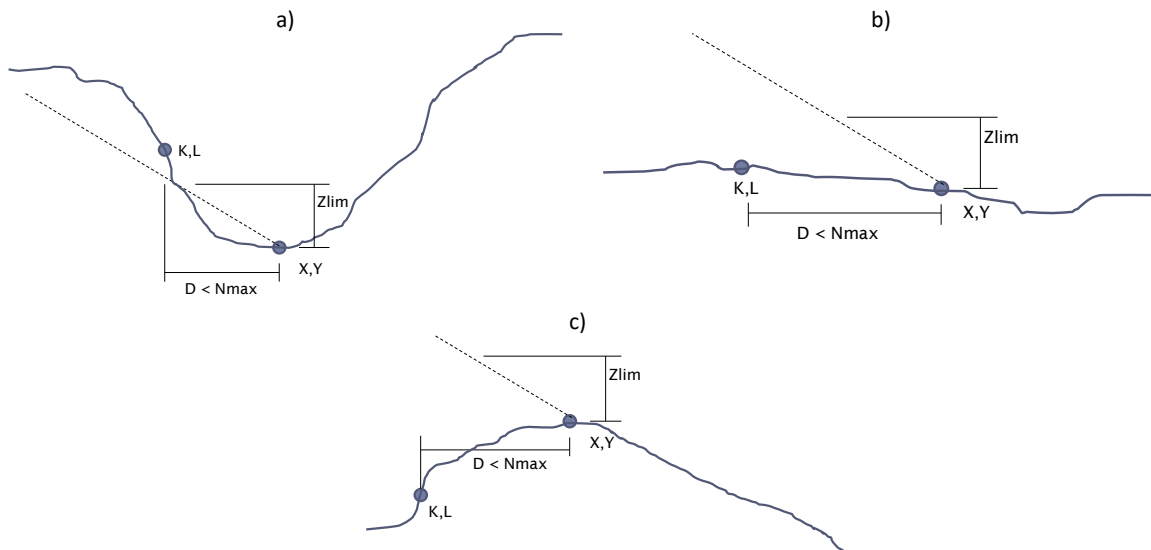


Figura 8. Exposición por topografía. a) Sitio de baja exposición, b) Sitio de exposición normal, c) Sitio de alta exposición

Como ejemplo, la Figura 9 muestra el mapa de factores K_{zt} calculados para San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

⁴ <https://search.earthdata.nasa.gov/>

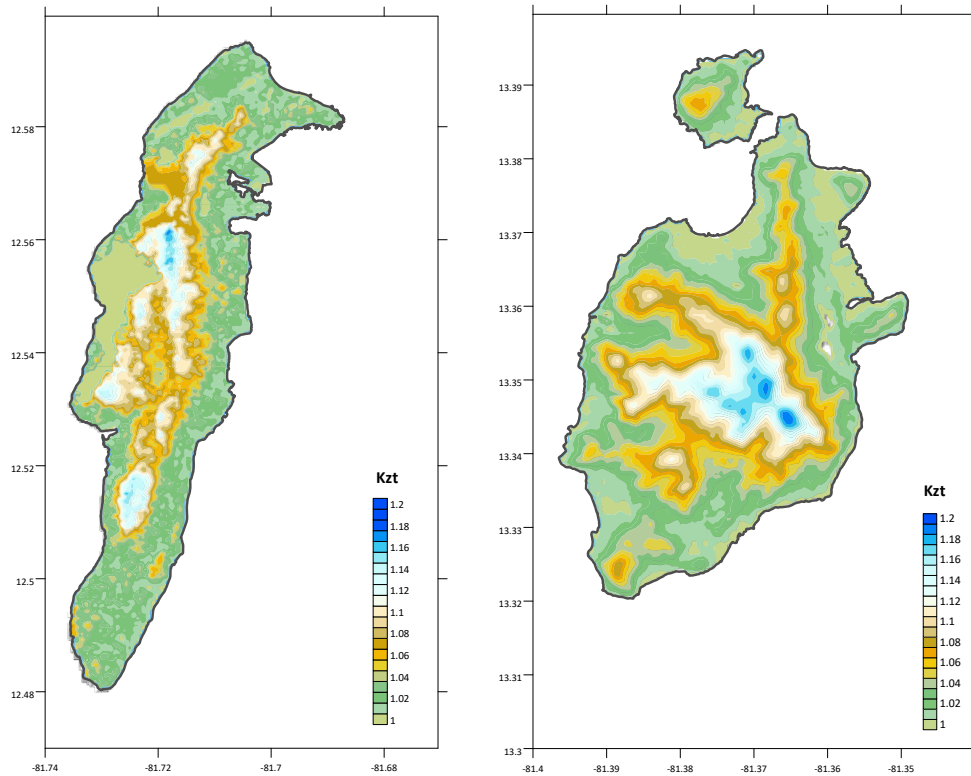


Figura 9. Mapa de Kzt para San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

2.4.4 Factor de ráfaga

Es ampliamente reconocido que el daño estructural es principalmente causado por ráfagas de corta duración, por lo cual es un estándar trabajar con ráfagas de 3 segundos para determinar fuerzas y presiones de diseño. Para modificar los valores promediados en una hora a promediados en 3 segundos, se requiere el cálculo de un factor de ráfaga, el cual no es más que una constante que amplifica los valores, buscando aproximar los máximos en menores duraciones. La Figura 10 muestra una serie de tiempo de velocidad del viento con diferentes tiempos de promediado. La serie roja es promediada en 1 hora, la serie naranja en 1 minuto y la serie gris en 3 segundos.

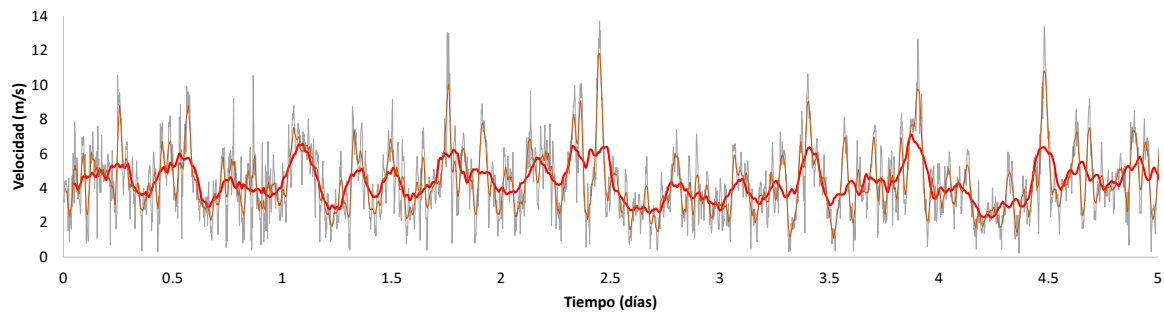


Figura 10. Series de velocidad del viento con diferentes tiempos de promediado

Las formulaciones existentes en la literatura para el factor de ráfaga se basan en los trabajos de Cartwright & Longuett-Higgins (1956) y Davenport (1964) en teoría de vibraciones aleatorias, enfocados en la distribución de probabilidad de los máximos de una función aleatoria. En este trabajo, se usa la propuesta de ESDU (2002) originalmente desarrollada para tormentas extra tropicales, pero que puede ser trasladada a ciclones tropicales dado que no existe evidencia que sugiera una diferencia fundamental en los factores de ráfaga de estos tipos de tormentas (Sparks y Huang, 1999; Vickery y Skerlj, 2005). El factor de ráfaga K_τ se define en ESDU (2002) como:

$$K_\tau = 1 + gI_u \quad \text{Ecuación 13}$$

en donde g es el factor pico y I_u es la intensidad de turbulencia, la cual no es más que el coeficiente de variación de la serie temporal. El factor pico g se calcula como:

$$g = 1 - 0.193 \left[\frac{T_u}{\tau} + 0.1 \right]^{-0.63} \quad \text{Ecuación 14}$$

en donde τ es la duración de ráfaga (3 segundos) y $T_u = 3.13 \cdot z^{0.2}$. La intensidad de turbulencia I_u se calcula como:

$$I_u = \frac{7.5\eta(0.538 + 0.09 \ln(z/z_0))^{\eta^{16}}}{2.5(1 + 0.156 \ln(u_*/f \cdot z_0)) \cdot (\ln(z/z_0) + 34.5 f \cdot z/u_*)} \quad \text{Ecuación 15}$$

en donde

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot f \cdot z}{u_*} \quad \text{Ecuación 16}$$

2.4.5 Campo de viento superficial

La velocidad del viento en ráfagas de 3 segundos a 10 metros sobre la superficie se calcula como:

$$v_{10} = u(z = 10m) \cdot K_{zt} \cdot K_\tau \quad \text{Ecuación 17}$$

Los campos de viento están dados en términos de la distribución geográfica de v_{10} . Por lo tanto, para cada ciclón histórico se calculan múltiples campos de viento, cada uno correspondiente a una simulación de la trayectoria histórica. Para cada conjunto de campos de viento, se ajusta un modelo de probabilidad en cada ubicación de la malla, definiendo así campos de viento probabilistas en los cuales v_{10} es una variable aleatoria.

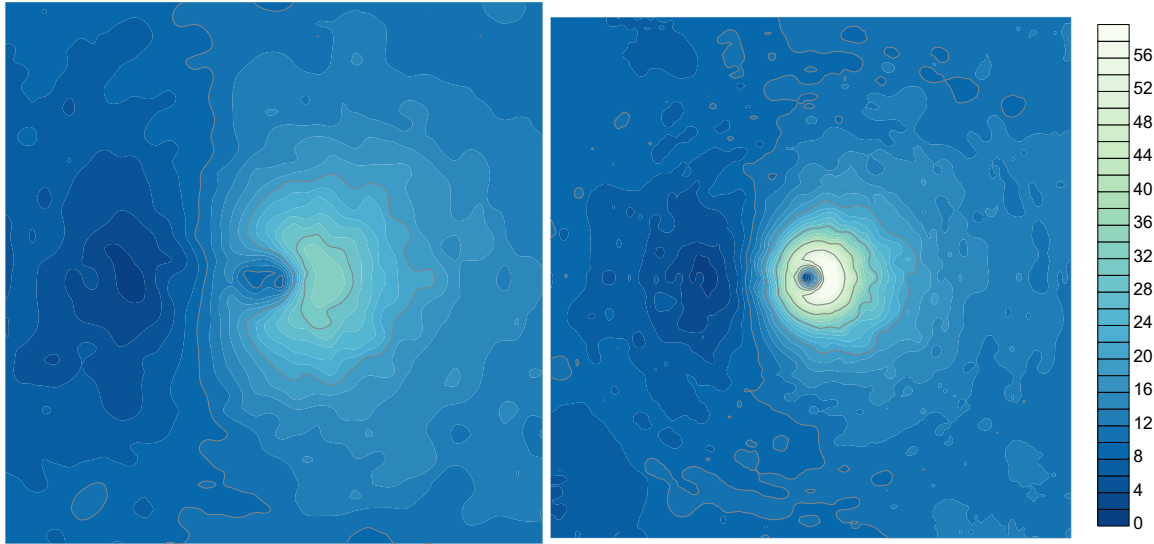


Figura 11. Ejemplos de campos de viento superficial, para huracanes con velocidad de avance de 10 m/s hacia el norte y presión central de 950 hPa (izq.) y 920 hPa (der.).

2.4.6 Amenaza por viento huracanado

Los campos probabilistas de viento de todos los ciclones simulados se integran por medio del teorema de la probabilidad total, para calcular la tasa anual de excedencia de una velocidad v_{10}^* arbitraria, para una ubicación geográfica específica, como (Bernal et.al. 2021):

$$v(v_{10}^*) = \sum_{i=1}^N P(v_{10} > v_{10}^* | C_i) \cdot F(C_i) \quad \text{Ecuación 18}$$

en donde $v(v_{10}^*)$ es la tasa anual de excedencia de v_{10}^* , N es el número total de ciclones simulados, $P(v_{10} > v_{10}^* | C_i)$ es la probabilidad que v_{10}^* dada la ocurrencia del ciclón C_i y $F(C_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del ciclón C_i .

La tasa de excedencia $v(v_{10}^*)$ constituye el parámetro del proceso de Poisson asociado a la ocurrencia de ciclones cuya velocidad local en el sitio de cálculo supere v_{10}^* . En este sentido, el periodo de retorno Tr de la velocidad v_{10}^* no es más que el valor esperado del tiempo entre eventos que superen v_{10}^* , y se determina como el inverso de la tasa de excedencia:

$$Tr(v_{10}^*) = \frac{1}{v(v_{10}^*)} \quad \text{Ecuación 19}$$

De esta manera es posible calcular velocidades de viento superficial para cualquier periodo de retorno de interés. La Figura 12 presenta mapas de amenaza (i.e. velocidad básica del viento) para San Andrés, Providencia y Santa Catalina, considerando exposición C, para 700 años de periodo de retorno.

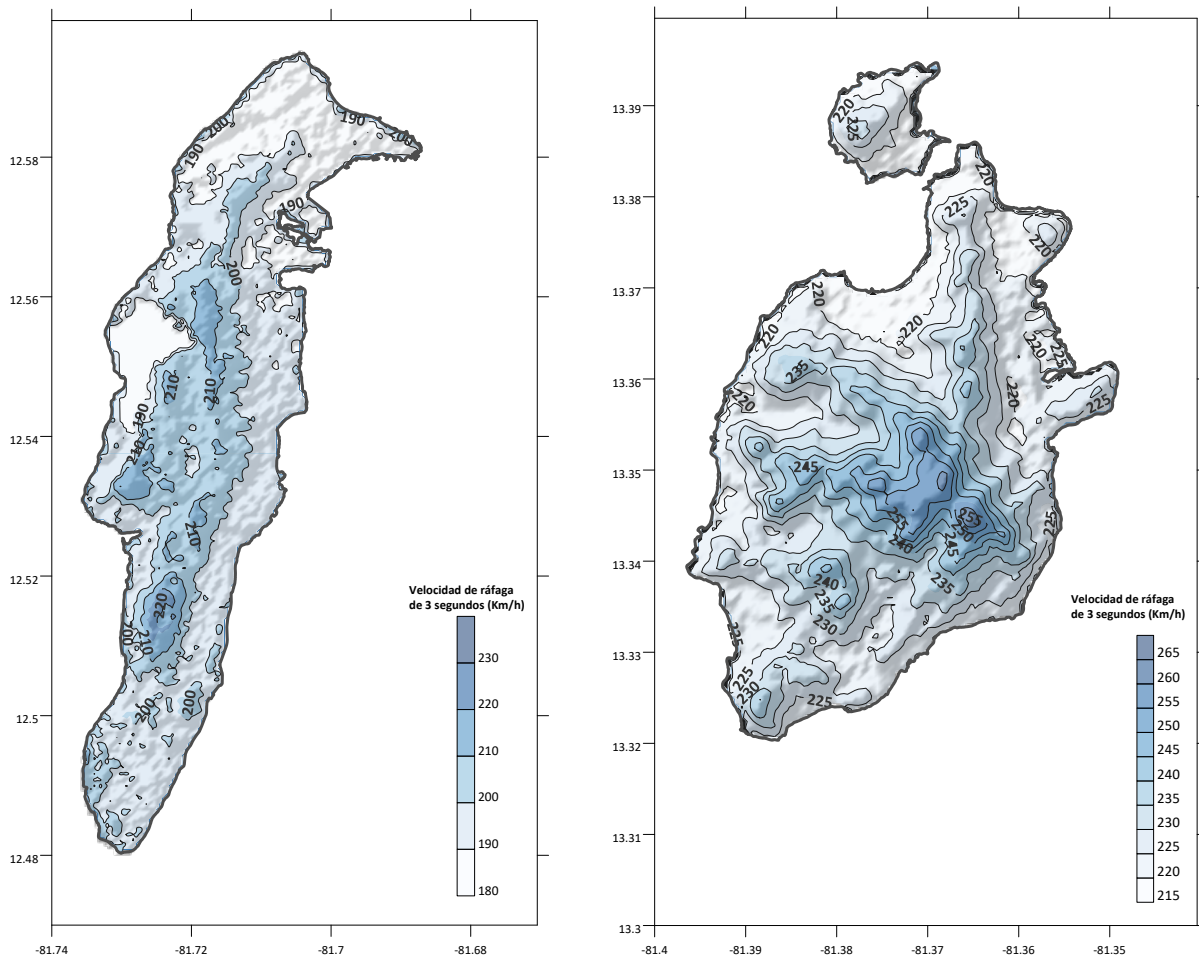


Figura 12. Mapa de velocidad del viento para exposición C. 700 años de periodo de retorno

2.5 Modelación de la marea de tormenta

La marea de tormenta constituye un efecto altamente significativo de los ciclones tropicales en zonas costeras. La sobreelevación del mar en las costas se debe principalmente al cortante superficial de los vientos huracanados, que empujan la superficie causando una corriente oceánica que cambia de dirección con la profundidad por cuenta de la espiral de Ekman causada por el efecto Coriolis de la rotación terrestre. También aporta la baja presión atmosférica en el centro de la tormenta, la cual produce una sobre elevación adicional. Al aproximarse a las costas, la batimetría local induce el aumento del nivel del mar, causando la inundación de grandes áreas costeras. La marea total (η) será simplemente la suma de la marea por cortante superficial del viento (η_c) y la marea por baja presión atmosférica (η_p).

$$\eta = \eta_c + \eta_p$$

Ecuación 20

El valor máximo de la sobre elevación de marea por viento se puede calcular usando el modelo de Tilburg y Garvine de 2003, el cual está basado en las ecuaciones de circulación oceánica de Ekman. La marea por viento se calcula en un punto específico sobre la línea de costa. En la aplicación de este modelo, la dirección x se considera paralela a la plataforma continental siendo la dirección y perpendicular.

$$\eta_c = \int_0^L -\frac{fU_x}{g} \sqrt{\frac{\rho_a c_a U}{\rho \cdot c_b |U_x|}} + \frac{\rho_a c_a U_y U}{\rho g D(y)} dy \quad \text{Ecuación 21}$$

En donde L es el ancho de la plataforma continental, ρ_a es la densidad del aire, c_a es el coeficiente de arrastre superficial, U es la velocidad del viento, ρ es la densidad del agua de mar, c_b es el coeficiente de arrastre del lecho marino, $|U_x|$ es la componente del viento que sopla en dirección paralela a la plataforma continental, U_y es la componente transversal a la plataforma y $D(y)$ es la función de forma del lecho marino (perfil batimétrico).

La marea por baja presión atmosférica se modela haciendo uso del efecto barométrico inverso, según el cual, para agua de mar, podemos asociar una sobre elevación de 1 cm por cada hPa de diferencial de presión (ver Ecuación 22). Esto requiere de la estimación del campo de presión asociado al ciclón, el cual se puede considerar simétrico y descrito por la ecuación presentada, como función de la presión central y el radio a los máximos vientos (Ecuación 23).

$$\eta_p = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$P(r) = P_0 + (P_n - P_0) \exp\left(-\frac{RMW}{r}\right) \quad \text{Ecuación 23}$$

En el norte de Colombia, el efecto de la marea no se espera que sea altamente significativo, esto debido a que las trayectorias ciclónicas pasan a una distancia lo suficientemente grande de la costa como para inducir una marea de tormenta relevante. La Figura 13 muestra el mapa de marea de tormenta obtenido de la simulación del huracán Joan (1988), el cual es el evento que mayores niveles de marea induce de todos los simulados. Como se puede apreciar, el valor de sobre elevación del mar no supera los 50 cm.

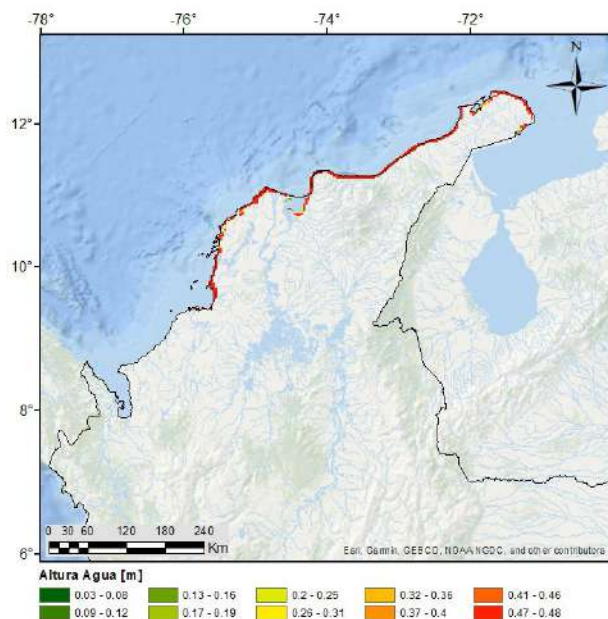


Figura 13. Sobre elevación por marea de tormenta simulada para el huracán Joan

En el caso de San Andrés y Providencia, las alturas de marea de tormenta son mucho más importantes. La Figura 14 muestra los mapas de marea de tormenta simulados para el huracán Iota (2020). Como puede verse, las áreas inundadas y los valores de sobre elevación son particularmente relevantes en el Archipiélago.

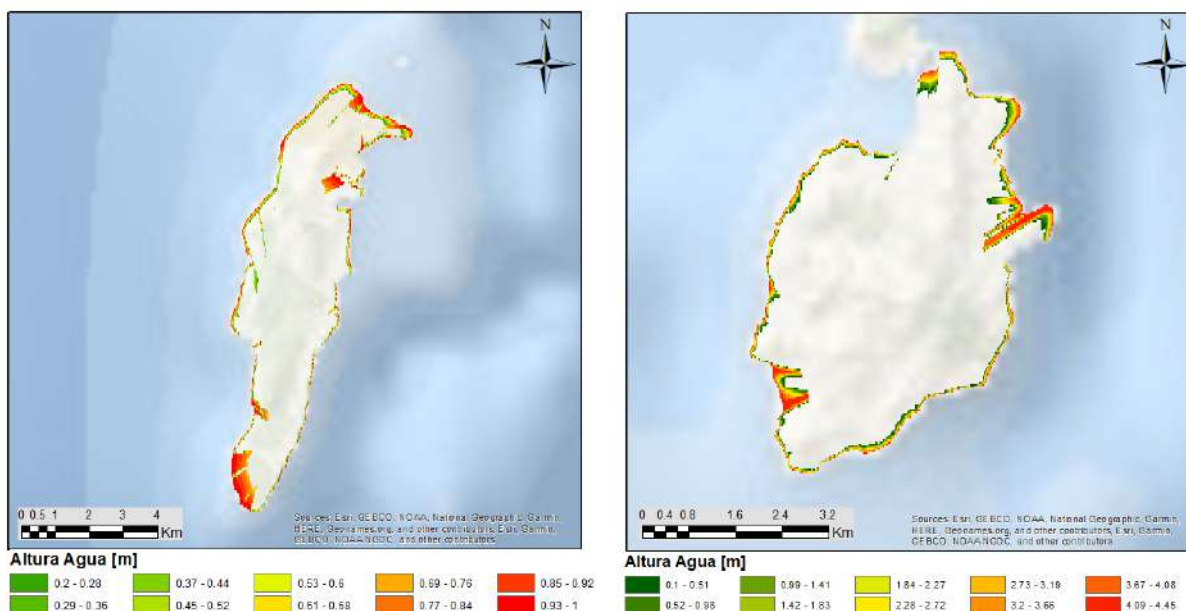


Figura 14. Sobre elevación por marea de tormenta simulada para el huracán Iota en San Andrés y Providencia

3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

A continuación, se presenta la metodología para la conformación del modelo de exposición de edificaciones, para el cual se consultaron como principales fuentes, la información catastral publicada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 desarrollado el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE e información de libre uso disponible para el área de estudio.

3.1 Información disponible para la construcción del modelo de exposición de edificaciones

3.1.1 Censo Nacional de Población y Vivienda

Entre las variables consultadas en el Censo Nacional de Población y Vivienda realizado en el año 2018, se dispone de estadísticas de vivienda como material predominante en las paredes exteriores, estrato del servicio de energía, tipo de vivienda, población, entre otras. Esta información fue consultada a través del sistema de procesamiento censal en línea Redatam, en el cual encontramos que el máximo nivel de resolución de la información es a nivel de manzanas.

Aunque la distribución de las variables del censo no se encuentra georreferenciada a nivel de detalle de vivienda, permite identificar a nivel de manzanas, las características predominantes de las viviendas y la distribución de las variables en los municipios. En las siguientes tablas y figuras se muestra la distribución de las variables mencionadas para los municipios objeto de estudio.

Tabla 3. Distribución de unidades por municipio según el estrato del servicio de energía

Estrato del servicio de energía	Número de unidades				
	Riohacha	Manaure	Uribe	San Andrés	Providencia y Sta. Catalina
Sin Estrato	2,377	1,730	349	222	17
Estrato 1	24,899	2,436	1,490	4,026	229
Estrato 2	8,680	526	348	6,171	1,093
Estrato 3	3,319	63	24	3,393	273
Estrato 4	198	5	5	376	16
Estrato 5	101	2	2	157	4
Estrato 6	12	1	1	45	0
No sabe el	87	40	39	78	2
No aplica	14,008	15,750	39,258	1,950	371
Total	53,681	20,553	41,516	16,418	2,005

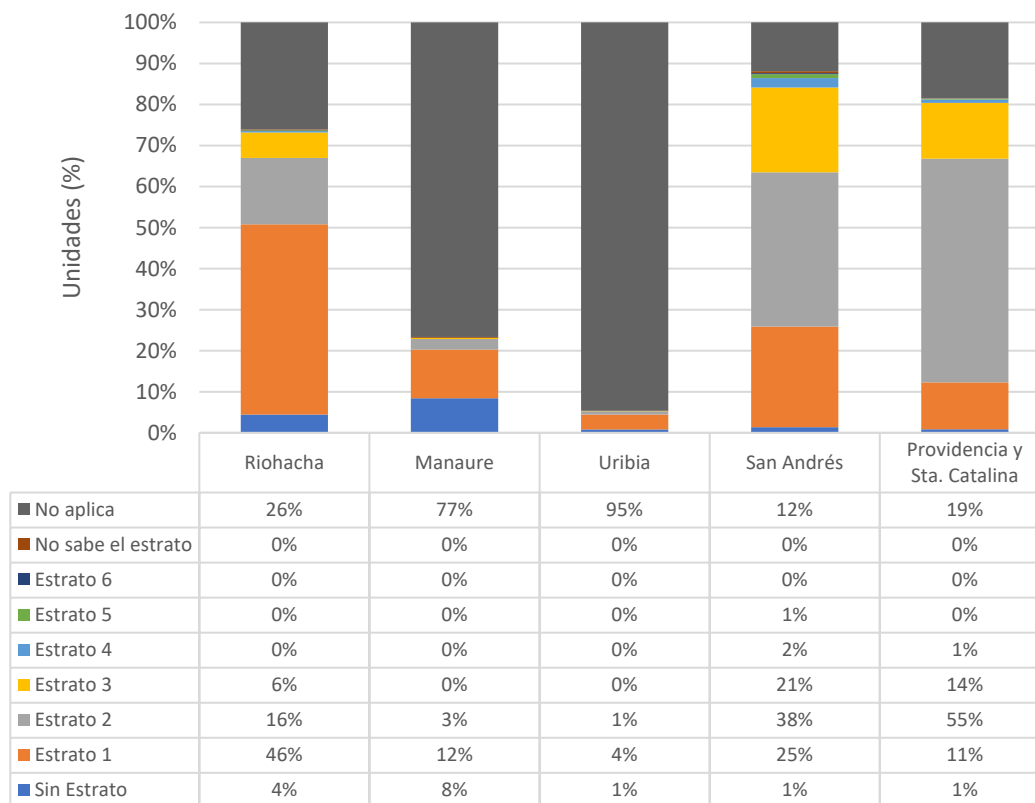


Figura 15. Distribución porcentual por municipio del estrato del servicio de energía

Tabla 4. Distribución de unidades por municipio según el material predominante en paredes exteriores

Material predominante en paredes exteriores	Número de unidades				
	Riohacha	Manaure	Uribia	San Andrés	Providencia y Sta. Catalina
Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida	33,208	3,044	4,182	12,069	745
Concreto vaciado	1,311	267	226	496	34
Material prefabricado	404	975	490	697	247
Guadua	2,033	1,084	9,705	0	1
Tapia pisada, bahareque, adobe	5,607	5,530	8,538	12	3
Madera burda, tabla, tablón	1,950	871	2,448	1,246	612
Caña, esterilla, otros vegetales	839	2,153	5,205	3	7
Materiales de deshecho	3,227	4,586	6,963	15	7
No tiene paredes	104	640	527	2	1
No aplica	4,998	1,403	3,232	1,878	348
Total	53,681	20,553	41,516	16,418	2,005

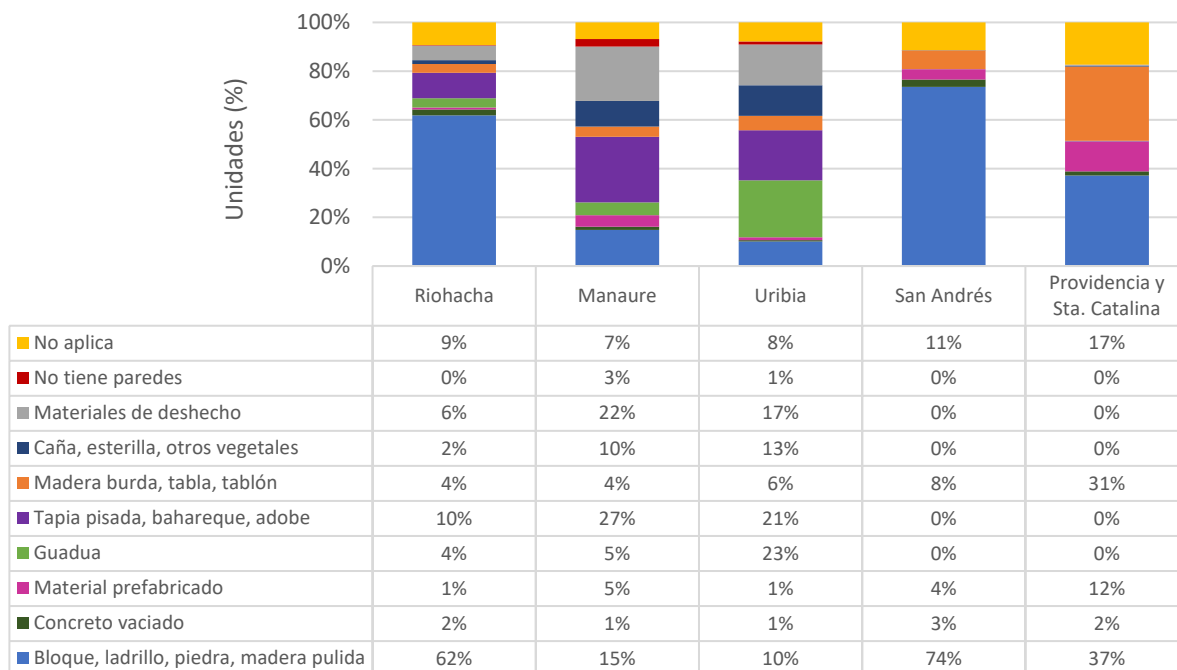


Figura 16. Distribución porcentual por municipio del material predominante en paredes exteriores

De acuerdo con las proyecciones de población calculadas por el DANE con base en los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV- 2018, la población estimada para el año 2023 en los municipios objeto de estudio, se distribuye como se muestra en la siguiente figura.

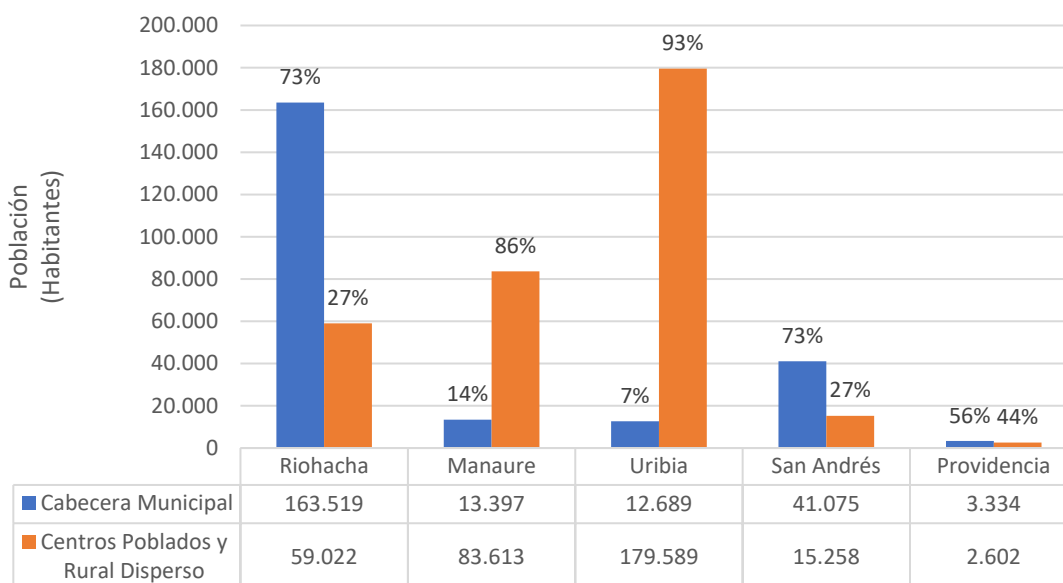


Figura 17. Distribución de población

3.1.2 Información catastral

En los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC se consultó la información catastral disponible para los municipios en el área de estudio. Entre la cual se encuentra la información cartográfica asociada al predio, que permite su georreferenciación, y la información alfanumérica a nivel de construcciones, que permite la caracterización de estas a partir de los siguientes atributos:

Tabla 5. Atributos descriptivos de las construcciones en los datos abiertos de catastro

REGISTRO 1	REGISTRO 2
Departamento	Departamento
Municipio	Municipio
Dirección	Zona física
Destino	Zona económica
Área del terreno	Área del terreno
Área construida	Habitaciones
	Baños
	Locales
	Pisos
	Tipificación
	Uso
	Puntaje
	Área construida

Los destinos económicos indicados en la base Registro 1 de los datos abiertos de catastro del IGAC, se agruparon en sectores de uso generales como se muestra en la siguiente tabla para cada municipio.

Tabla 6. Destino Registro 1 – IGAC por municipio

Destino Registro 1 IGAC	Sector de uso	Riohacha	Manaure	Uribia	San Andrés	Providencia y Sta. Catalina
Habitacional	Residencial	36041	2827	3970	5985	1157
Industrial	Industrial	9	10	4	7	1
Comercial	Comercial	2793	74	1	357	156
Cultural	Institucional	1	1	0	19	20
Recreacional	Institucional	20	3	0	18	17
Salubridad	Salud	72	14	1	3	5
Institucionales	Institucional	188	27	37	84	25
Educativo	Educación	173	36	4	84	53
Religioso	Institucional	125	19	0	33	13
Agroindustrial	Industrial	0	0	0	9	0
Uso Publico	Institucional	1	0	0	7	0
Lote urbanizable no urbanizado	No válido	474	29	7	52	6
Lote urbanizado no construido	No válido	80	4	6	4	0
Lote no urbanizable	No válido	12	0	0	15	0
Agrícola	No válido	5	0	0	0	1
Pecuario	No válido	1	0	0	0	0

Destino Registro 1 IGAC	Sector de uso	Riohacha	Manaure	Uribia	San Andrés	Providencia y Sta. Catalina
Forestal	No válido	0	0	0	1	0
Servicios Especiales	No válido	1	0	0	0	0
Agropecuario	No válido	3	4	0	476	65
Mínero	No válido	1	0	2	0	0
Sin dato		856	11	24	622	57
Total		40856	3059	4056	7776	1576

La información cartográfica también incluye atributos de las construcciones como número de pisos, en la siguiente figura se muestra su distribución por municipio.

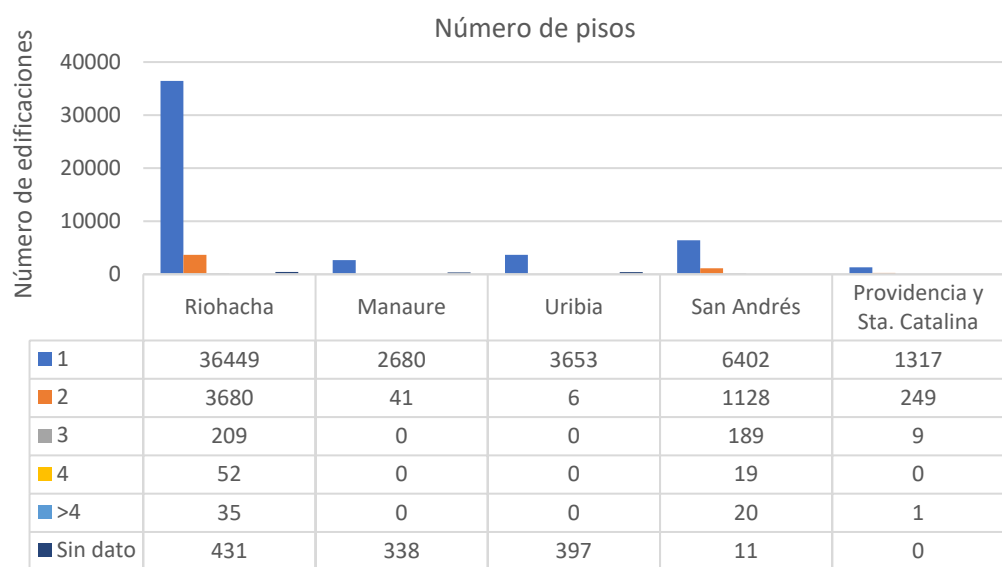


Figura 18. Número de pisos por municipio - IGAC

3.1.3 Google Open Buildings

Para la actualización de la información de estudios previos y para los municipios en los que no se encuentra información disponible en las fuentes mencionadas anteriormente, Google cuenta con un conjunto de datos abiertos denominado “Open Buildings”, que está conformado por una colección de huellas de edificaciones de diferentes regiones del mundo. Esta información es derivada del modelo denominado U-Net, utilizado en el análisis de imágenes satelitales que considera las diferentes variaciones en estas para la identificación de las huellas.

Además de la geometría de la huella de una edificación, la base de datos cuenta con los atributos de: i) coordenadas del centroide (latitud y longitud), ii) área del polígono -en metros-, y iii) el puntaje de confianza de la edificación identificada.

A partir del puntaje de confianza de la edificación, Google solo considera elementos en su base de datos que tengan un valor de confianza superior a 0.65 como se observa en la Figura 19. Sin embargo, utilizando criterios adicionales dados por las características de la región de estudio, se pueden definir umbrales de confianza mayores que permitan reducir la inclusión de falsas detecciones.



Figura 19. Huellas identificadas en Google Open Buildings en la Guajira (Uribia).. Elaboración propia a partir de Google Earth Engine

Esta fuente de información tiene como fecha de actualización mayo de 2023, por lo que se considera la fuente de información geométrica más actualizada en comparación con fuentes de información oficiales como es el IGAC.

3.1.4 Global Human Settlement (GHS) Building Height

El Centro Común de Investigación (JRC por sus siglas en inglés) de la Unión Europea ha elaborado una serie de información espacial a nivel global que presenta información acerca de población, niveles de urbanización y edificaciones. Entre los productos elaborados se encuentra un dataset raster que representa la distribución espacial de la altura media de los edificios en un píxel de resolución de 100 m. La Figura 20 presenta el raster descrito para el casco urbano de Magangué en la región de La Mojana.

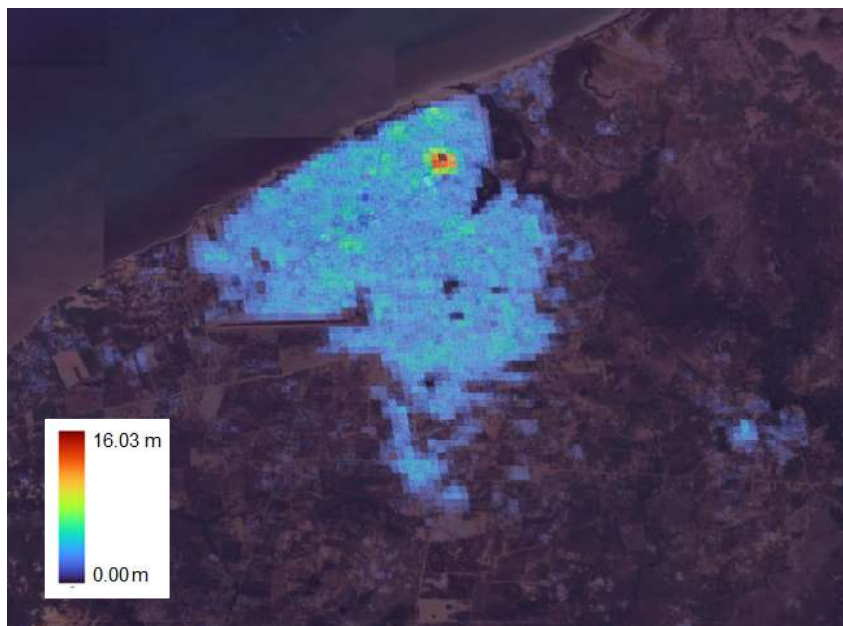


Figura 20. Raster de altura media de edificaciones en la Guajira (Riohacha). Elaboración propia a partir de GHS – Building Height (JRC, 2023)

La información del JRC adiciona -cuando no se cuente con dicho atributo- a los elementos expuestos un valor de altura media, que permite la estimación de un número de pisos para las edificaciones. El número de pisos es un atributo relevante en la composición del modelo de exposición dado que contribuye a la caracterización física del elemento que incidirá en su vulnerabilidad y la estimación de área construida, que define de manera directa en la valoración económica del elemento.

La información satelital utilizada para derivar este producto tiene como fecha de cohorte el año 2018, que se considera apropiada en la medida que no se considera que existan cambios significativos en las alturas medias en las regiones de estudio desde dicha fecha.

3.2 Conformación del modelo de exposición de edificaciones

Para construir el modelo de edificaciones expuestas, se partió de la base cartográfica de Google Open Buildings y progresivamente se complementó con los atributos de las fuentes enunciadas previamente.

Cabe destacar que, en el caso de los municipios de La Guajira se redujo la base de datos de construcciones del IGAC exclusivamente a elementos que tuvieran en su atributo de uso: comercial, educación, industrial, institucional y salud. Lo anterior se debe a los errores de georreferenciación de la base en los municipios de La Guajira, los cuales se corrigieron en la base de datos simplificada.

Mediante los siguientes diagramas se describe el proceso de integración y depuración de la información recopilada en las fuentes anteriormente mencionadas.

3.2.1 Georreferenciación

La totalidad de la geometría de los elementos expuestos en el presente caso tiene como fuente la base cartográfica de Google Open Buildings. Se descartó la utilización de la geometría de la base de datos a nivel de construcción del IGAC, debido a que cuenta con multiplicidad de errores en la georreferenciación de los elementos, así como un alto grado de desactualización en el número de construcciones en los municipios.

Google Open Buildings en su modelo de identificación de huellas de construcción tiene un rendimiento variable según las regiones, dado que pueden existir multiplicidad de errores de identificación asociados a i) el nivel de urbanización del área de estudio, asociado a la proximidad de edificaciones, y ii) el tipo de superficie, específicamente del contraste entre las cubiertas y la cobertura del suelo circundante (Sirko et al, 2021). Por lo anterior, la definición del valor de umbral está sujeto a las características propias de cada área de estudio. En el presente caso, el valor de umbral se obtiene de la realización de un análisis comparativo de la información vectorial de las huellas y las imágenes satelitales, así como de la exclusión de huellas con áreas significativamente bajas, de tal manera que se garantice, en lo posible, la exclusión de erróneas detecciones.

Considerando lo enunciado, se definieron diferentes criterios de exclusión de polígonos para la región del archipiélago y para los municipios de La Guajira. Los criterios se definieron a partir de la comparación entre las imágenes satelitales y la base geométrica vectorial de Google Open Buildings.

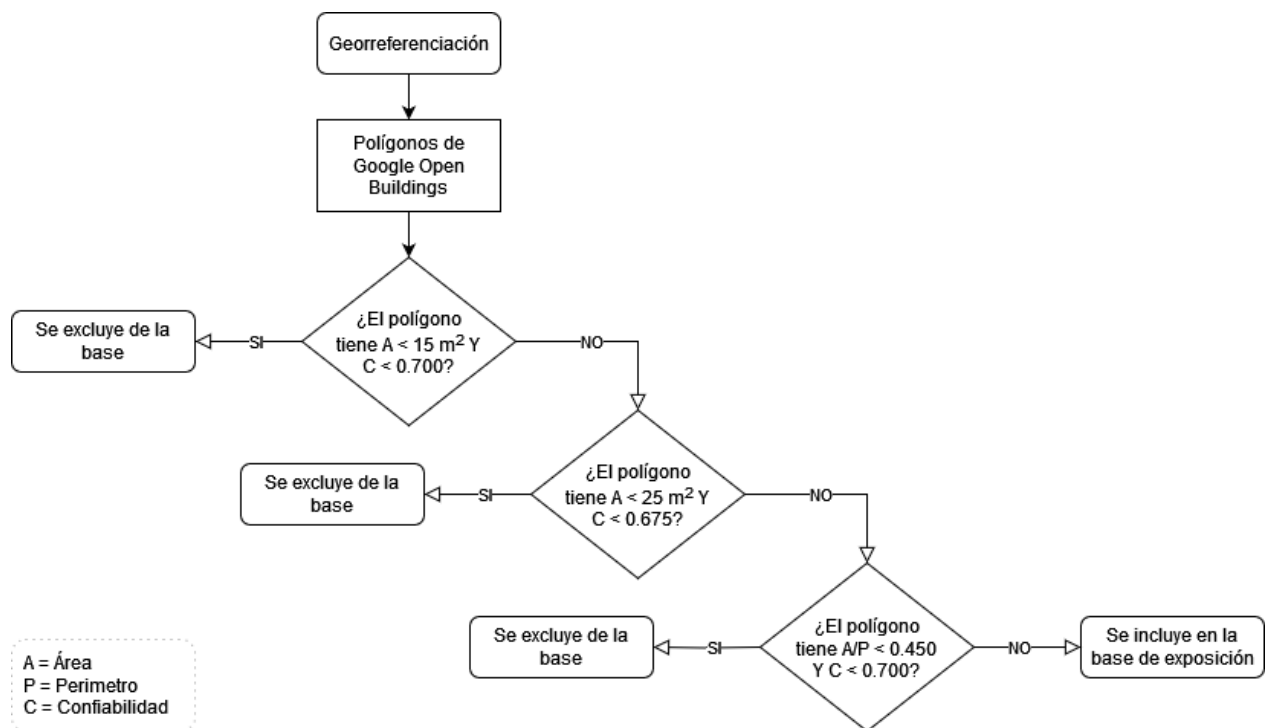


Figura 21. Georreferenciación de las edificaciones del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

La ejecución del procedimiento en el caso de San Andrés, Providencia y Santa Catalina redujo el número de registros de 28 868 a 26 816, representado un cambio de -7.1% en la base de elementos expuestos.

La Figura 22 presenta el procedimiento implementado para los municipios de la Guajira.

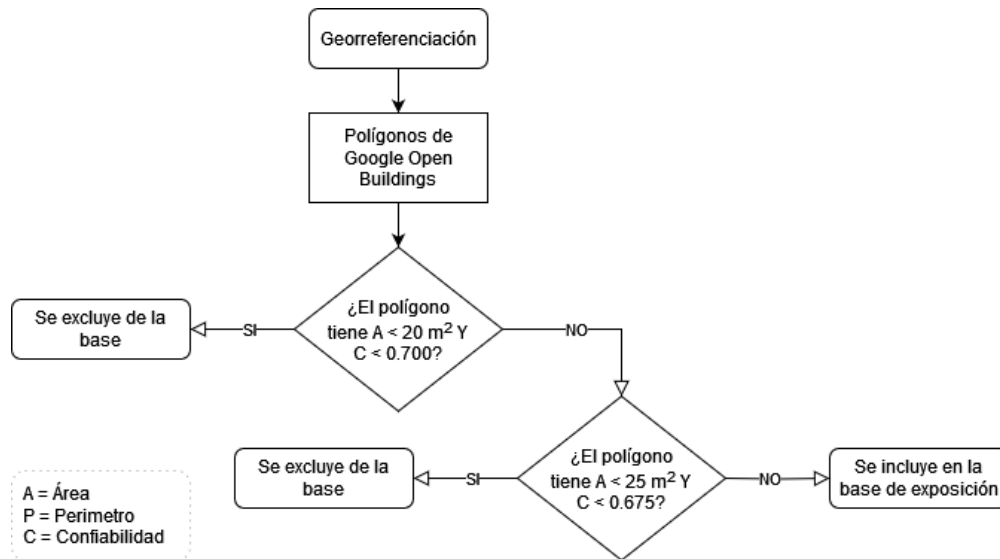


Figura 22. Georreferenciación de las edificaciones de los municipios de La Guajira

La ejecución del procedimiento en el caso de los municipios de La Guajira redujo el número de registros de 277 420 a 254 748, representado un cambio de -8.2% en la base de elementos expuestos.

3.2.2 Número de pisos

El procedimiento de asignación de número de pisos contempla la asociación espacial de atributos de la información del IGAC a nivel de construcción y la información del JRC.

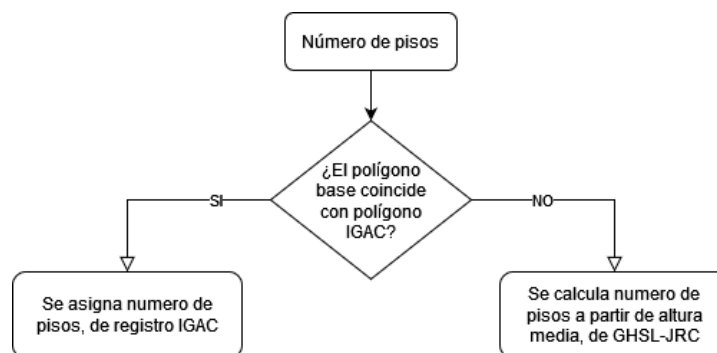


Figura 23. Asignación de número de pisos

El 31.8% de los registros del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se asignaron con información de la base cartográfica del IGAC. Para el caso de los municipios de La Guajira, el 1.1% de los registros se asignaron utilizando la información del IGAC.

3.2.3 Sector de uso

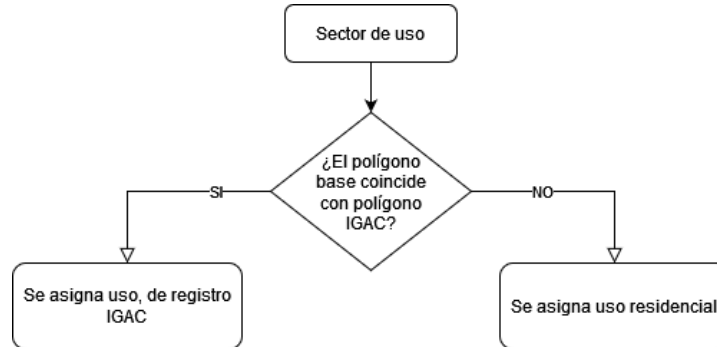


Figura 24. Asignación de sector de uso

Al plantear el algoritmo de asignación de sector de uso, se considera que la información del IGAC tiene su concentración geográfica en las cabeceras municipales, y estas a su vez concentran los sectores de uso diferentes a los residenciales de los municipios. Por otra parte, en los centros poblados y rural disperso donde se cuentan con bajos registros del IGAC, predomina el uso de suelo residencial.

El 27.3% de los registros del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se asignaron con información de la base cartográfica del IGAC. Para el caso de los municipios de La Guajira, el 1.1% de los registros se asignaron utilizando la información del IGAC.

3.2.4 Categoría socioeconómica

Para determinar la categoría socioeconómica de las edificaciones, la fuente de información corresponde a la variable “Estrato del servicio de energía” del Censo de Población y Vivienda elaborado por el DANE, información que se encuentra publicada a nivel de resolución de manzana y que se agrupó en las categorías socioeconómicas indicadas en la Tabla 7.

El algoritmo realiza un procedimiento de asignación aleatoria dentro de los polígonos de cada manzana de tal manera que se garantice la representación estadística en la misma. La asignación, aunque es aleatoria, sigue unos criterios definidos por los números de pisos o el área en planta, que limitan la posibilidad de asignaciones erróneas en el modelo de exposición. En caso de que la edificación no se encuentre dentro de ninguna manzana del DANE, se utiliza la distribución estadística del municipio. La Figura 25 presenta el algoritmo de asignación para la categoría socioeconómica.

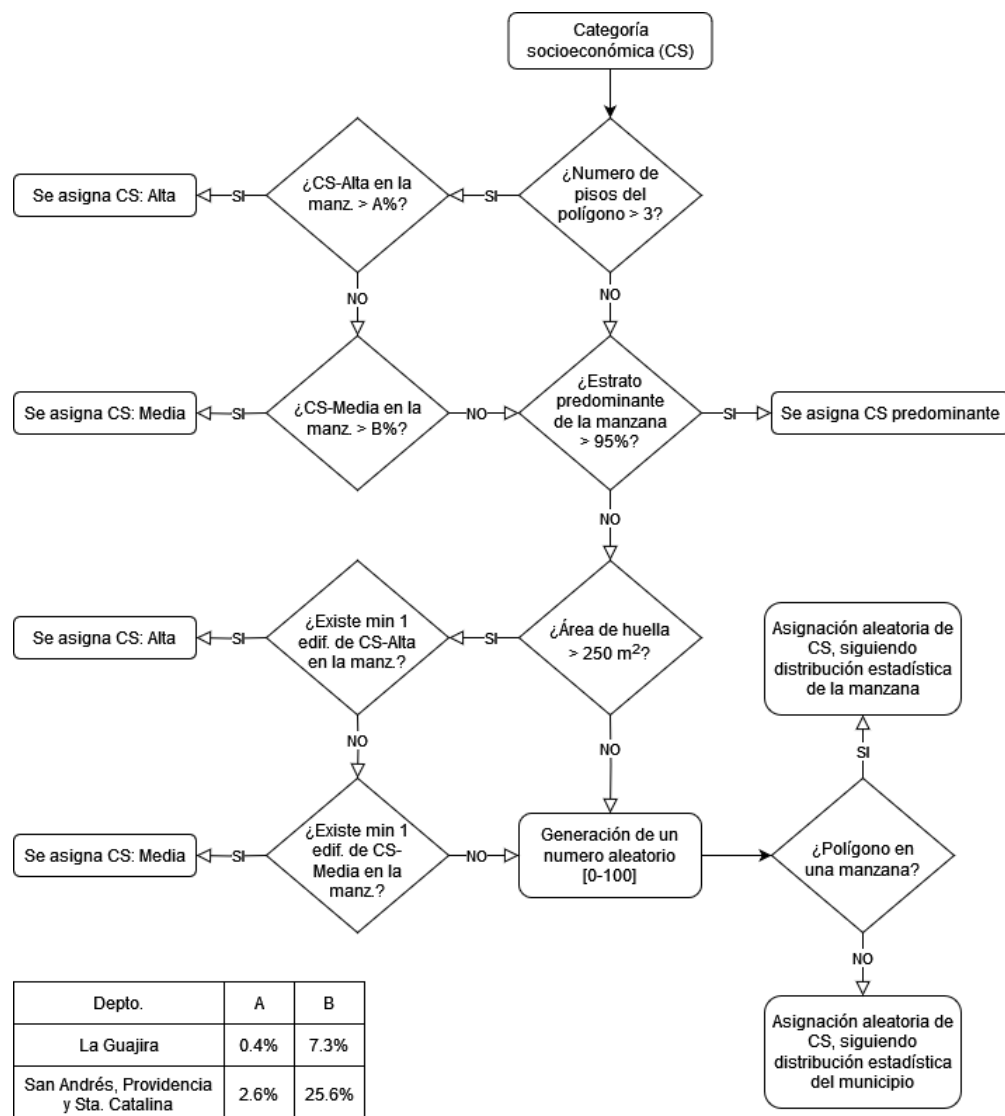


Figura 25. Asignación de categoría socioeconómica

La Tabla 7 presenta los resultados por municipio, al aplicar el algoritmo de asignación.

Tabla 7. Categoría socioeconómica por municipio

Estrato del servicio de energía	Categoría socioeconómica	Riohacha	Manaure	Uribia	San Andrés	Providencia y Sta. Catalina
Estrato 1	Baja	90.80%	92.68%	92.69%	68.99%	76.97%
Estrato 2						
Estrato 3	Media	8.53%	7.22%	7.30%	26.88%	21.98%
Estrato 4						
Estrato 5	Alta	0.67%	0.10%	0.01%	4.13%	1.05%
Estrato 6						

3.2.5 Sistema estructural

El sistema estructural se define en el presente modelo de exposición a partir de la variable “material de pared” del Censo de Población y Vivienda elaborado por el DANE, información que se encuentra publicada a nivel de resolución de manzana y que se agrupó en las siguientes categorías: concreto, mampostería, tierra, madera y desecho.

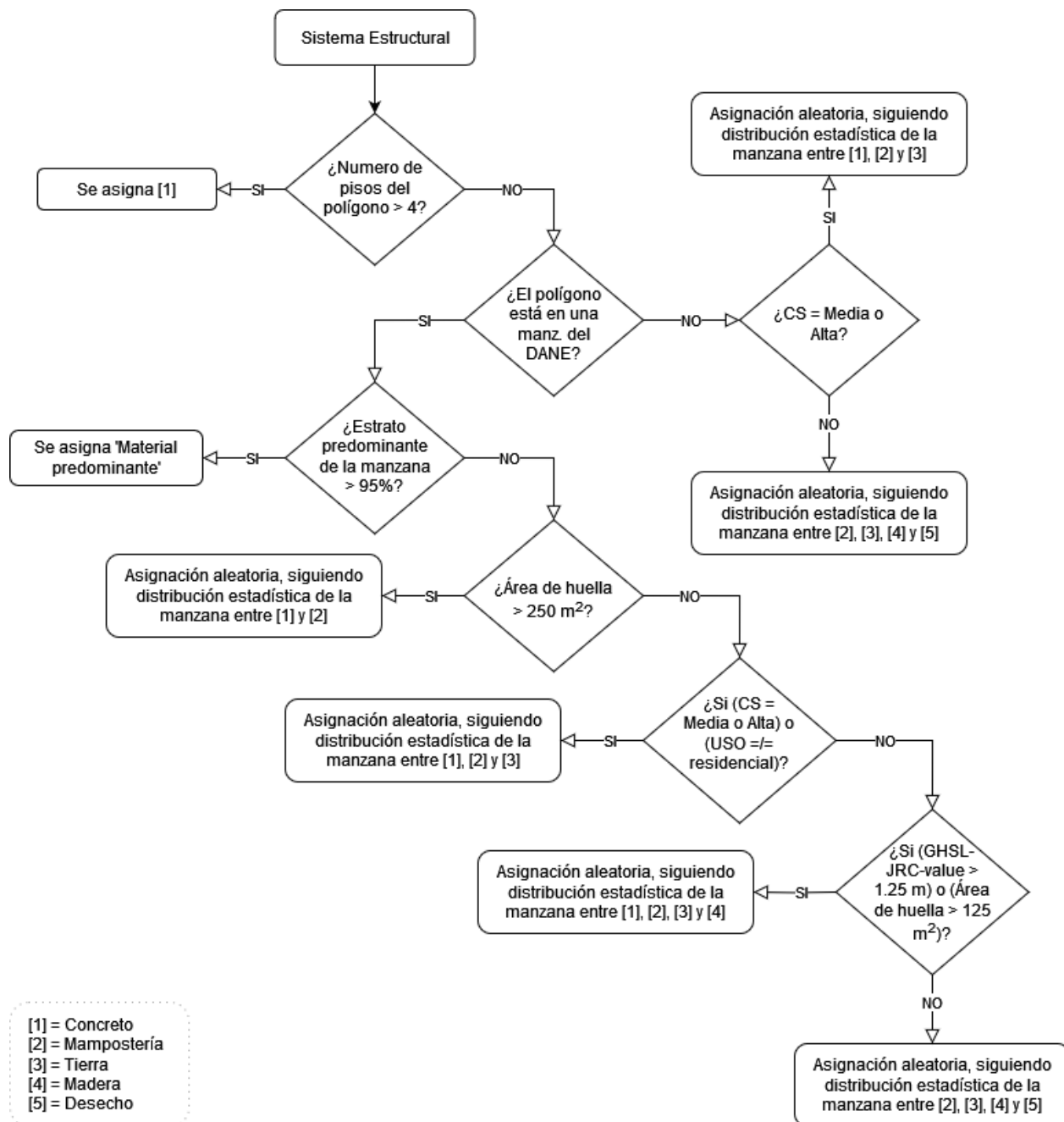


Figura 26. Asignación de sistema estructural

La Tabla 8 presenta la asignación resultante de aplicar el algoritmo en cada municipio.

Tabla 8. Sistema estructural por municipio

Sistema estructural	Riohacha	Manaure	Uribia	San Andrés	Providencia y Sta. Catalina
Concreto	3.6%	4.0%	4.3%	9.1%	16.8%
Mampostería	81.2%	75.7%	75.8%	83.6%	58.0%
Tierra	4.9%	7.6%	6.3%	0.1%	0.1%
Madera	4.9%	4.5%	5.1%	7.0%	24.9%
Desecho	5.4%	8.2%	8.6%	0.1%	0.2%

3.2.6 Valoración económica

Los valores por metro cuadrado se definieron a partir de las valoraciones económicas planteadas en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia –Fase 1, y ajustados a partir de los avalúos catastrales municipales estimados por el IGAC para San Andrés, Providencia y Santa Catalina en el año de 2018 y para Riohacha en el año de 2015. Las valoraciones catastrales fueron proyectadas a 2023 utilizando el IPC.

Tabla 9. Valor por metro cuadrado para modelo de exposición por huracán

Sistema Estructural	Categoría Socioeconómica	Valoración COP/m2
Concreto	Baja	1,536,400
	Media	2,626,300
	Alta	3,383,100
Mampostería	Baja	601,600
	Media	1,757,900
	Alta	2,917,200
Tierra	Baja	721,900
	Media	2,109,500
	Alta	2,109,500
Madera	Bajo	300,800
Desecho	Bajo	210,600

3.3 Caracterización de la exposición de edificaciones

En las siguientes figuras se muestra la distribución de valor expuesto y número de edificaciones para las variables descritas en los numerales anteriores.

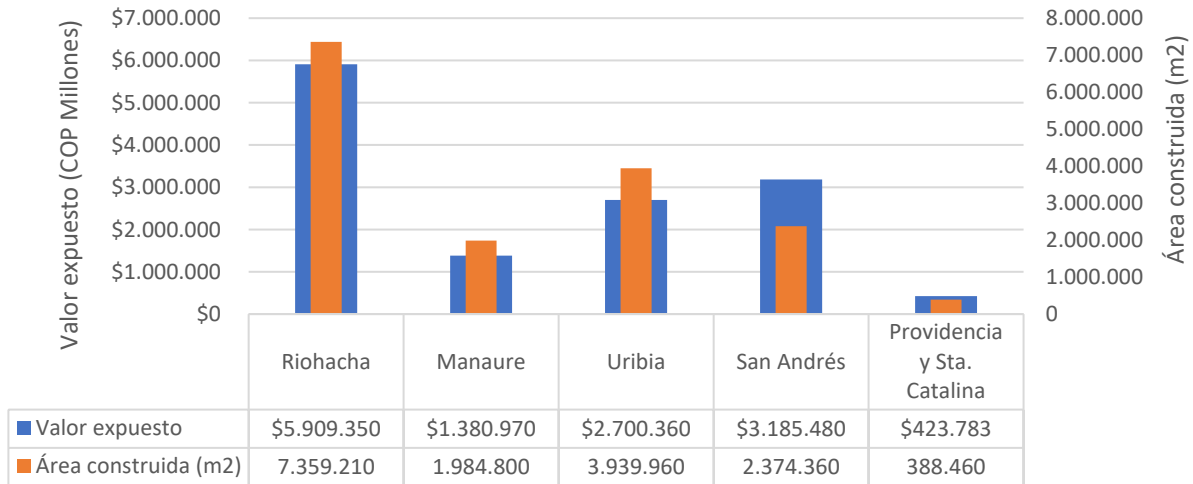


Figura 27. Valor expuesto y área construida por municipio

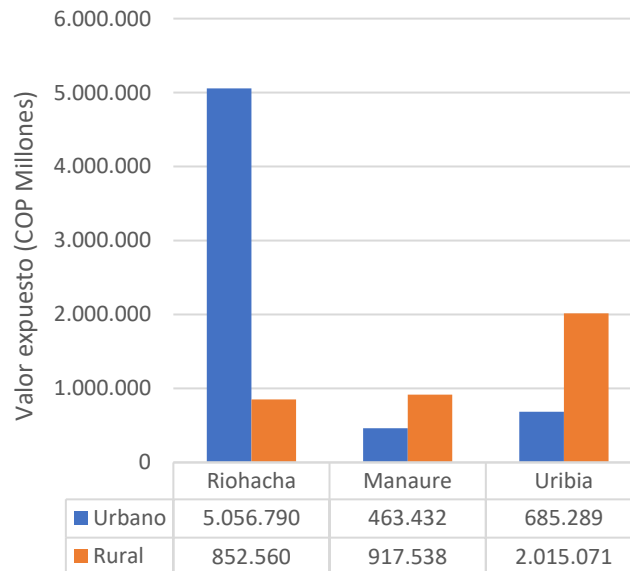


Figura 28. Valor expuesto por categoría en municipios de La Guajira

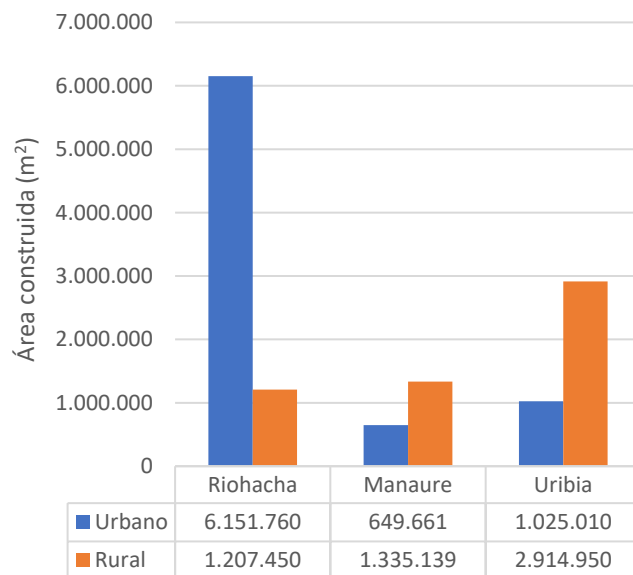


Figura 29. Área construida por categoría en municipios de La Guajira

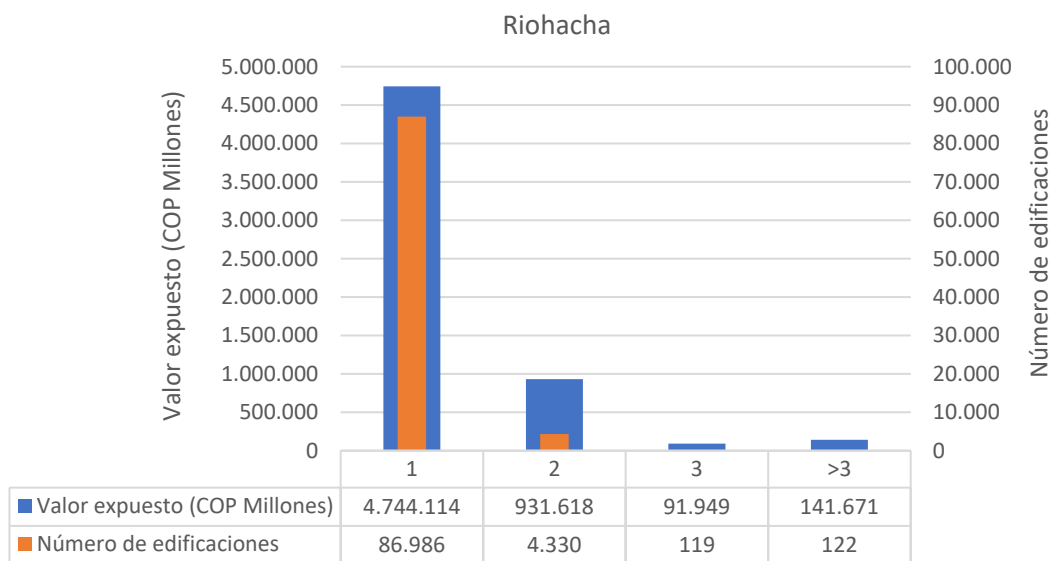


Figura 30. Número de pisos – Riohacha

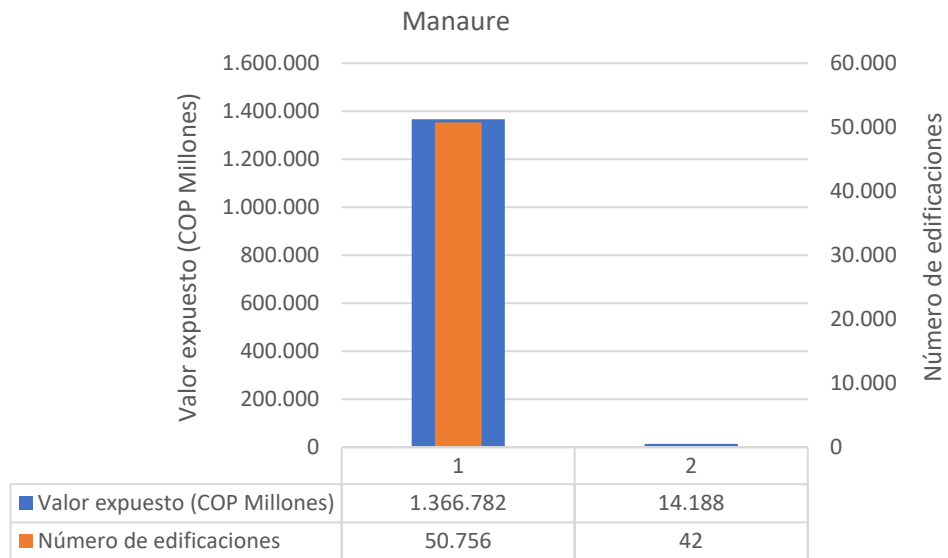


Figura 31. Número de pisos – Manaure

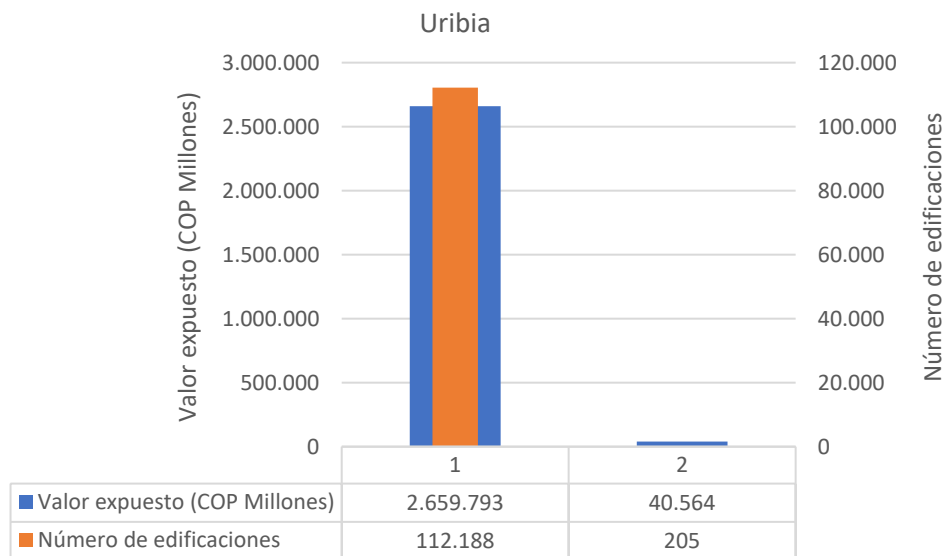


Figura 32. Número de pisos – Uribe

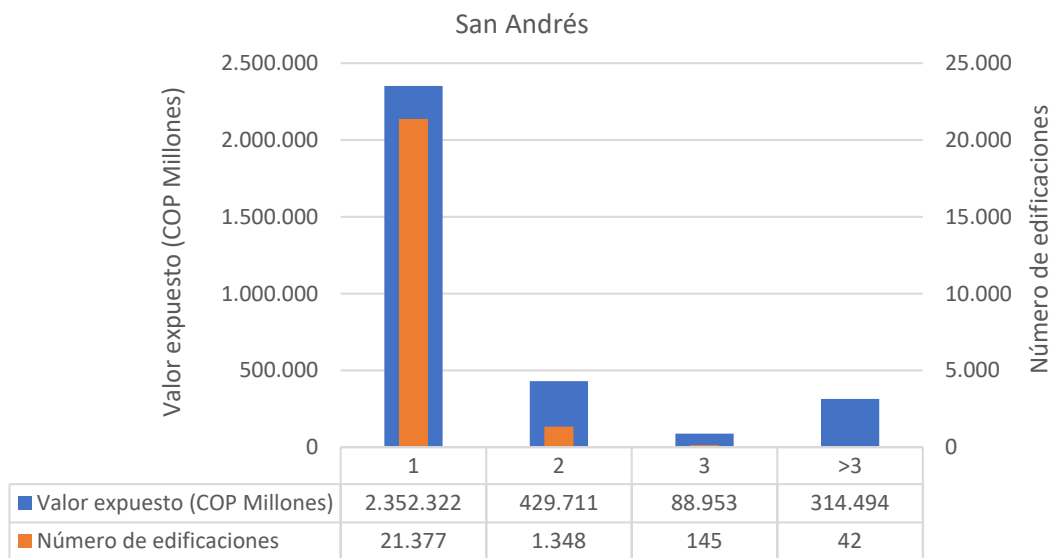


Figura 33. Número de pisos – San Andrés

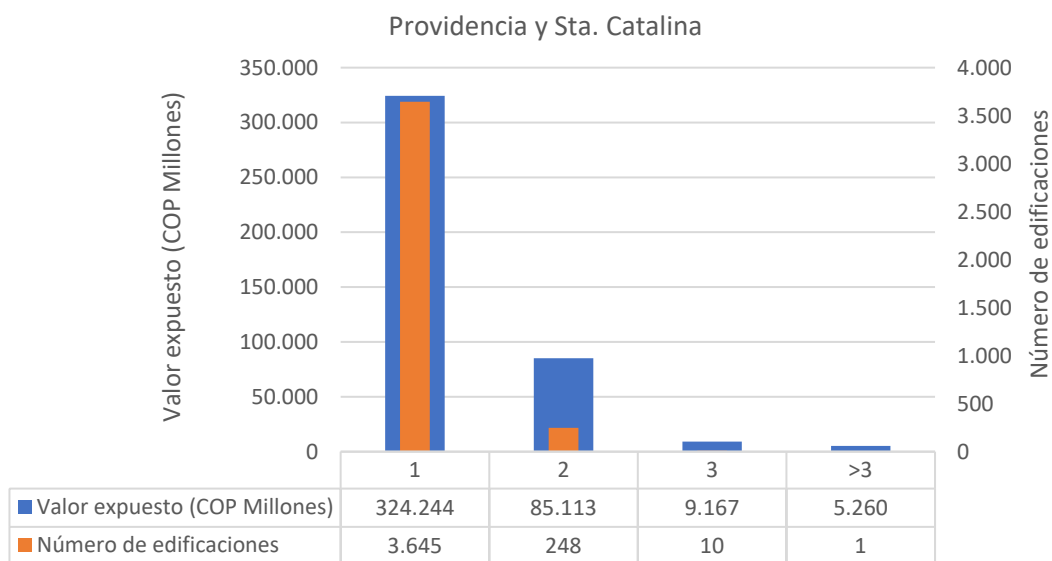


Figura 34. Número de pisos – Providencia y Sta. Catalina

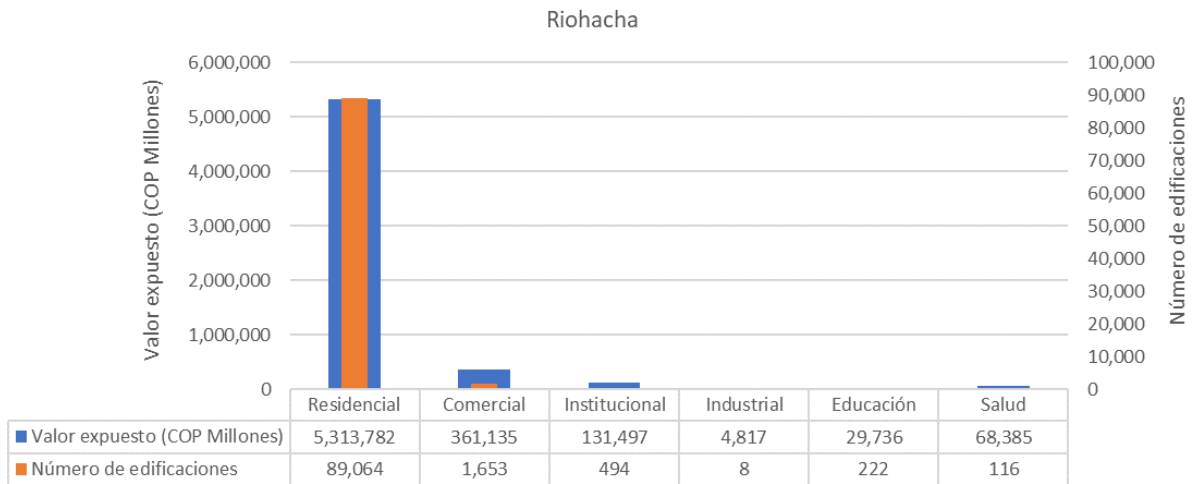


Figura 35. Sector de uso - Riohacha

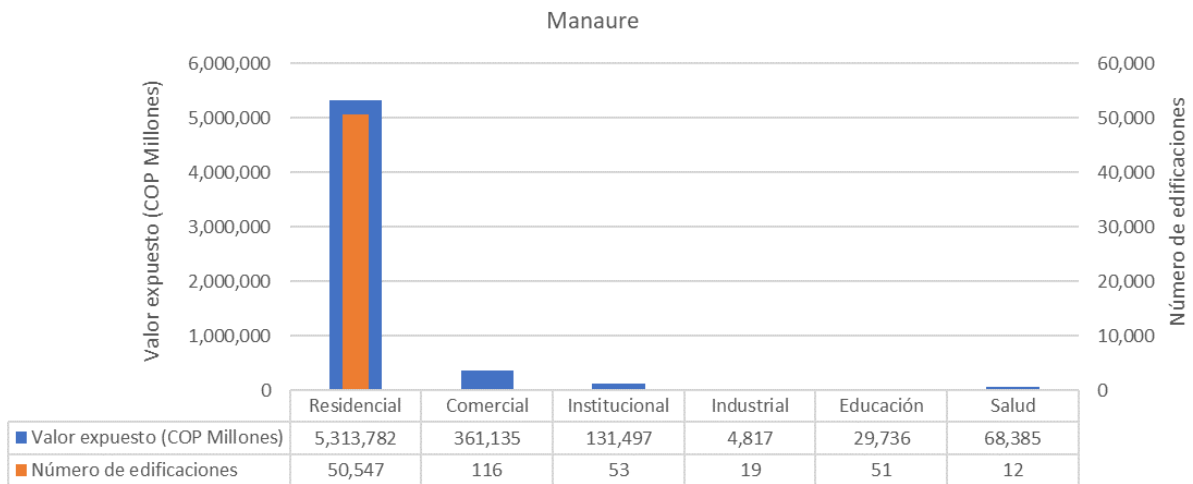


Figura 36. Sector de uso - Manaure

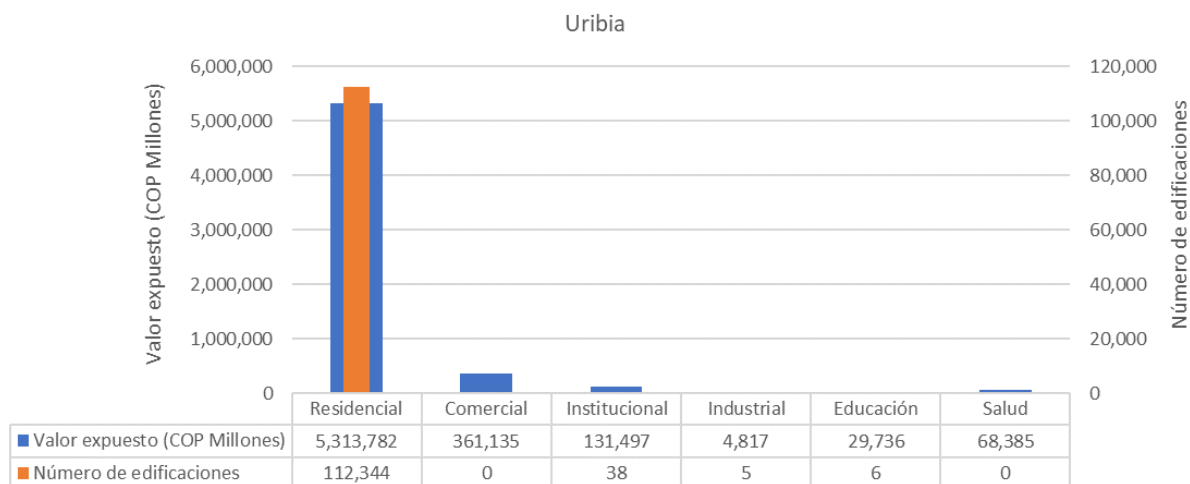


Figura 37. Sector de uso – Uribia

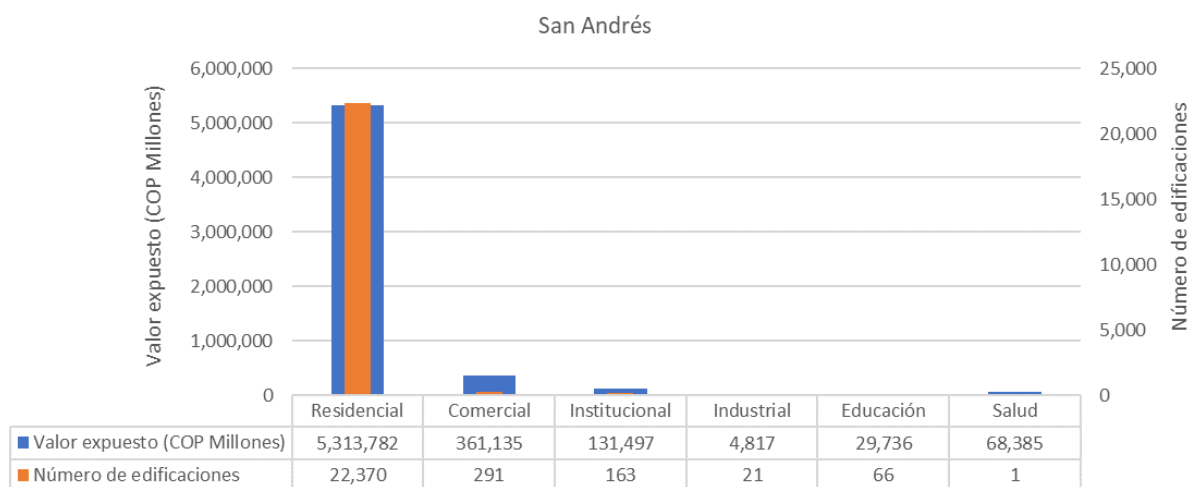


Figura 38. Sector de uso – San Andrés

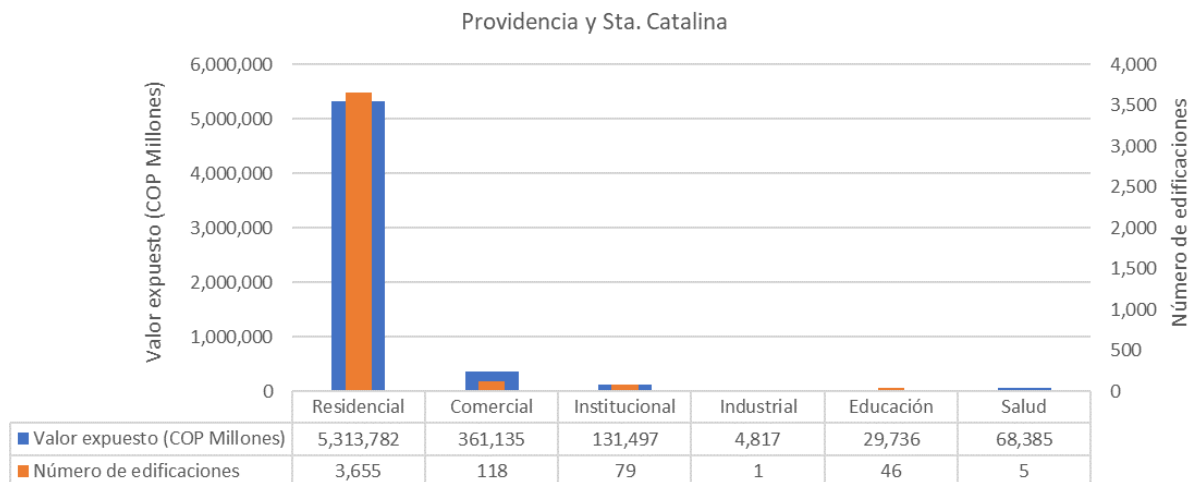


Figura 39. Sector de uso – San Andrés

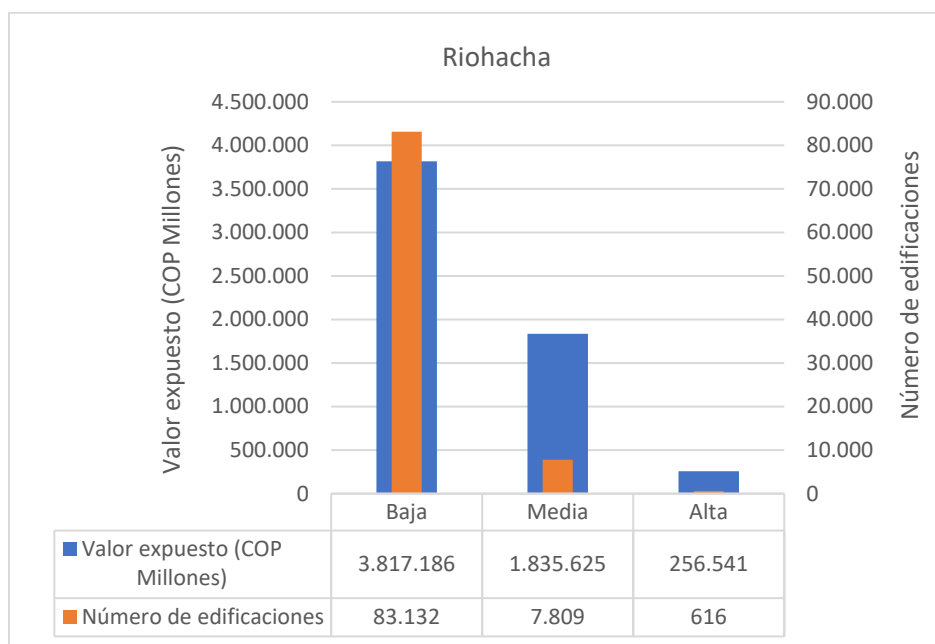


Figura 40. Categoría socioeconómica – Riohacha

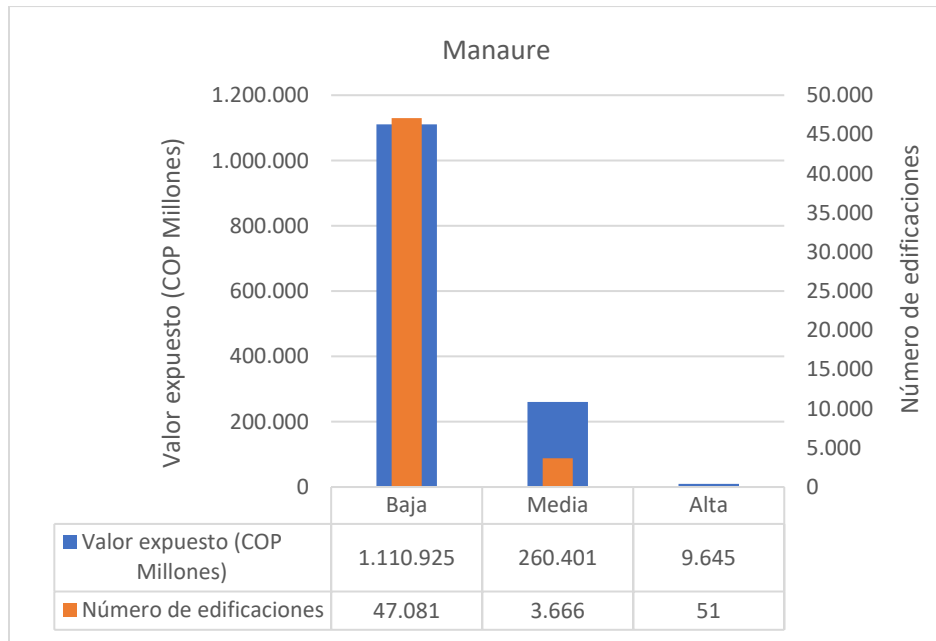


Figura 41. Categoría socioeconómica – Manaure

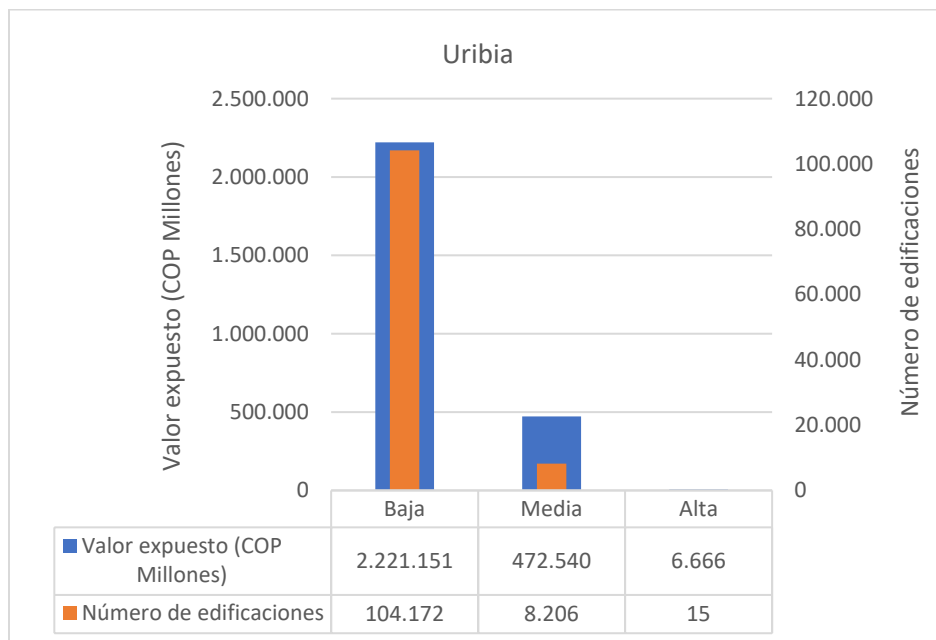


Figura 42. Categoría socioeconómica – Uribia

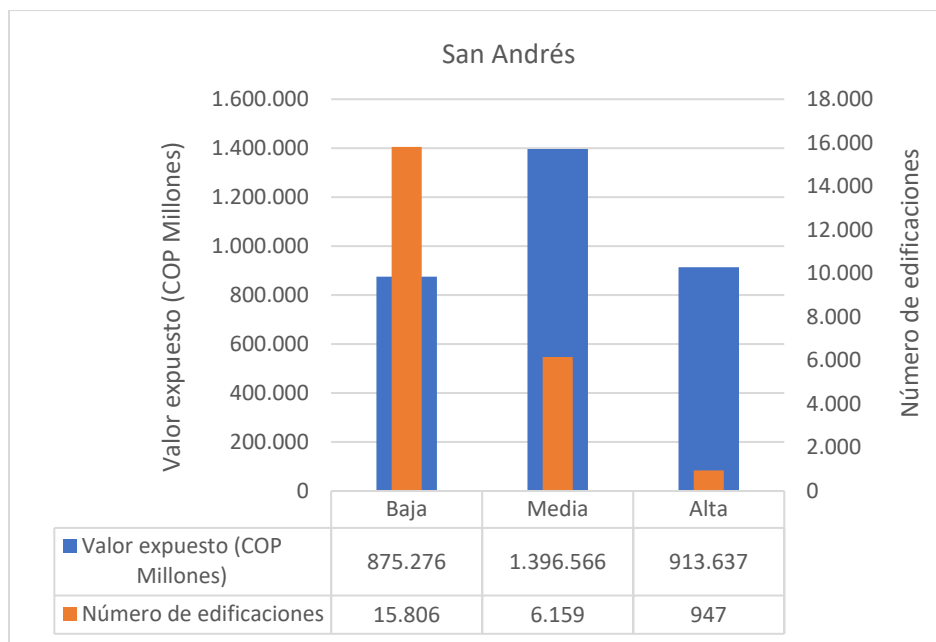


Figura 43. Categoría socioeconómica – San Andrés

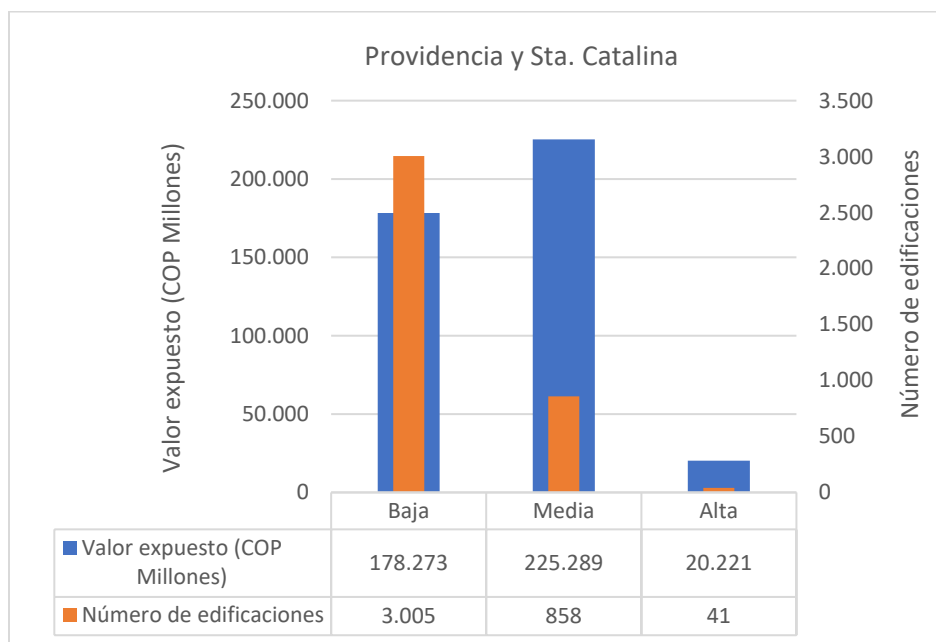


Figura 44. Categoría socioeconómica – Providencia y Sta. Catalina

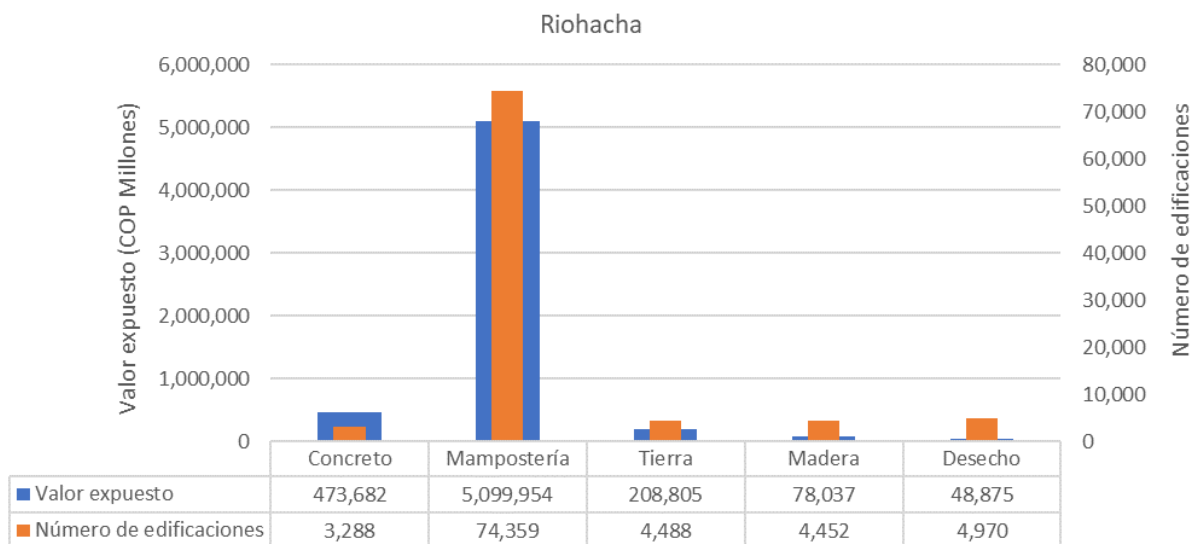


Figura 45. Sistema estructural – Riohacha

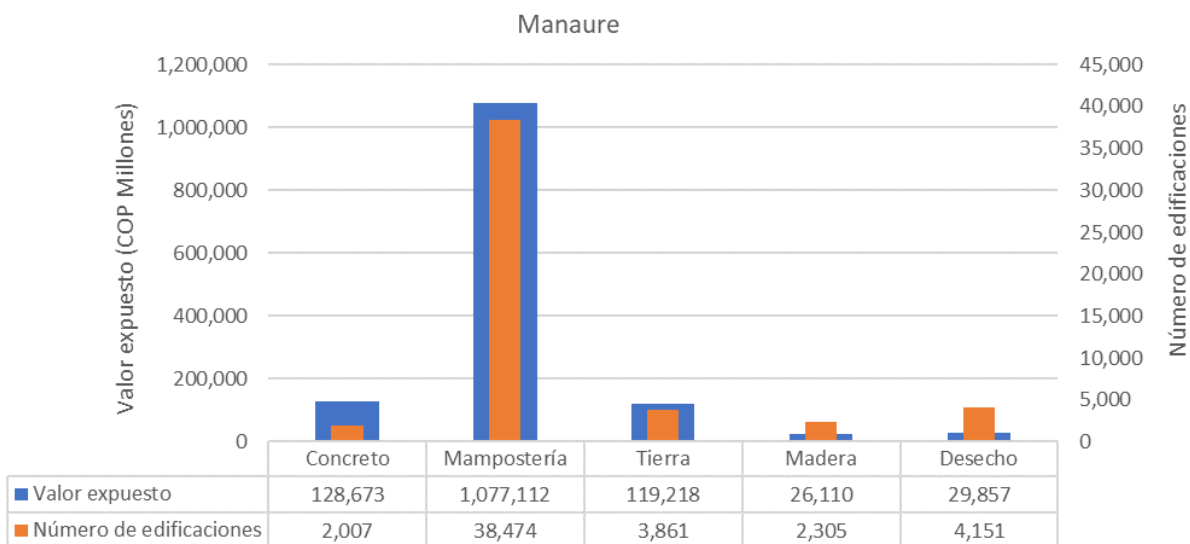


Figura 46. Sistema estructural – Manaure

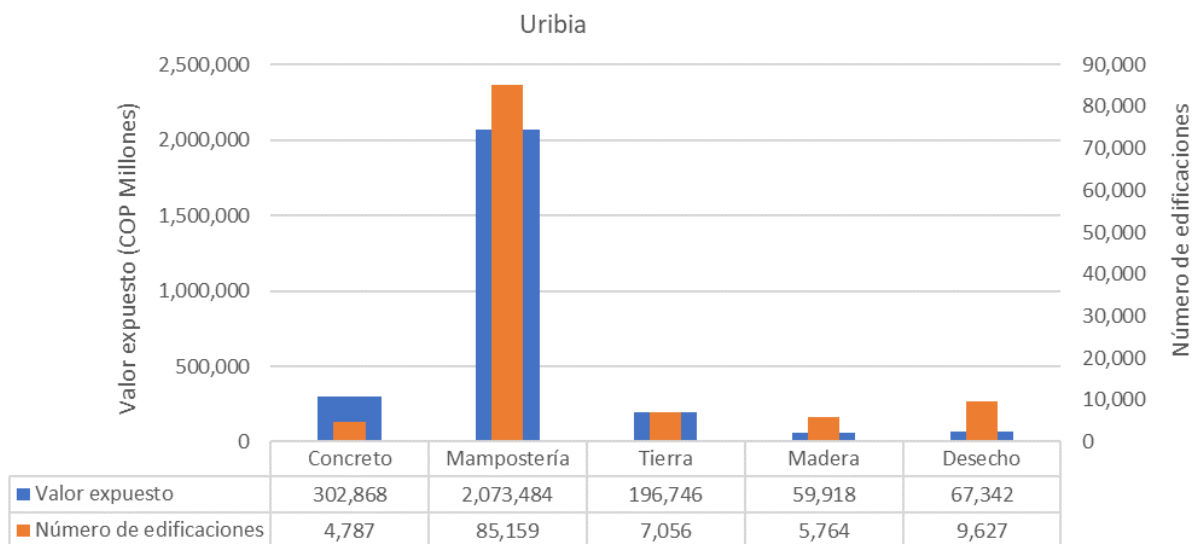


Figura 47. Sistema estructural – Uribia

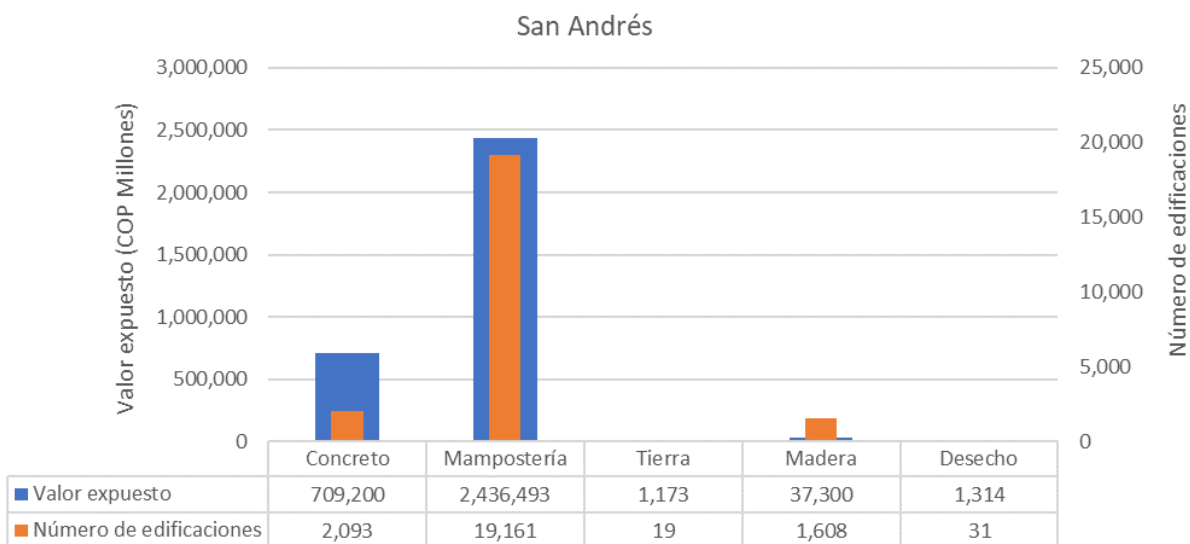


Figura 48. Sistema estructural – San Andrés

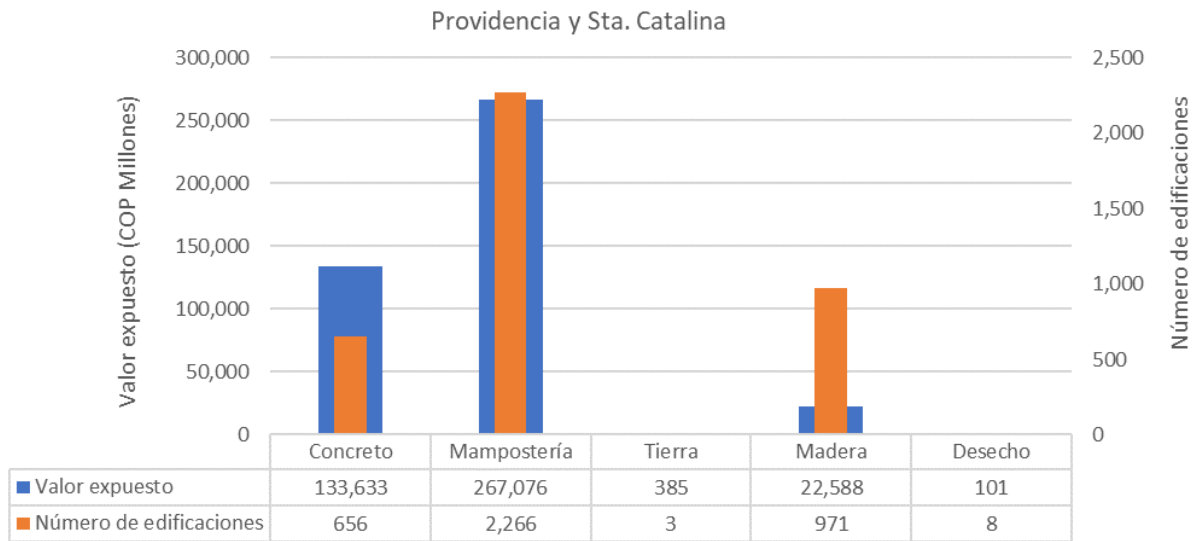


Figura 49. Sistema estructural – Providencia y Sta. Catalina

4 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad puede entenderse como las características del entorno construido para resistir el impacto derivado de la ocurrencia de un evento peligroso. Estas características determinan el grado en el cual la integridad del entorno construido, así como la vida y medios de subsistencia de quienes habitan dicho entorno, quedan en riesgo por cuenta del evento peligroso. La vulnerabilidad cuantifica entonces las condiciones de inseguridad del entorno construido, las cuales responden a un proceso social de generación, acumulación e incremento.

Por lo tanto, la vulnerabilidad debe entenderse como un fenómeno de origen social, controlado por las condiciones sociales, políticas y económicas de una región, el cual deriva en un estado vulnerable del entorno construido que, desde el punto de vista físico, materializa dicho proceso en términos de las pérdidas que pudieran ocurrir. Es esta vulnerabilidad física, asociada a pérdidas económicas directas, la que es objeto de modelación en esta sección. No obstante, se hace especial énfasis en establecer que la vulnerabilidad física del entorno construido en una región depende de factores no físicos, como los mencionados anteriormente, y que, los cuales serán considerados en fases posteriores de este proyecto como agravantes de los efectos físicos de los desastres.

En este sentido, la vulnerabilidad física es una característica intrínseca de los elementos expuestos y que caracteriza su comportamiento ante la acción adversa de un fenómeno peligroso. Está definida mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan los momentos de probabilidad (valor esperado y varianza) de la pérdida en el elemento expuesto, como función de la intensidad de la amenaza que ocurra en su ubicación.

4.1 Modelo probabilista de la pérdida

En modelación del riesgo catastrófico las pérdidas se tratan como variables aleatorias. Esto permite considerar directamente en los cálculos la incertidumbre inherente a los montos de pérdida causados por uno u otro evento de una amenaza que pueda manifestarse. La vulnerabilidad se define elemento por elemento dentro del portafolio de exposición, lo que significa que la pérdida a la cual se hace referencia aquí es la de un solo elemento expuesto. Para generalizar, la pérdida puede definirse como una variable en el intervalo de 0 a 1, es decir, desde cero hasta el 100% del valor expuesto del elemento (e.g., el valor de reposición de un bien inmueble). Esto significa que, en adelante y en general cuando se habla de vulnerabilidad, la pérdida corresponde siempre a una pérdida relativa de acuerdo con el grado de daño; es decir, es una fracción del valor expuesto.

En general, no se cuenta con información suficiente sobre daños y pérdidas causadas en eventos históricos que permitan ajustar un modelo de probabilidad a la pérdida con base en estimaciones estadísticas. Este no es un problema exclusivo del contexto alrededor del volcán Galeras, sino una condición de base que se cumple en cualquier contexto y para cualquier amenaza en cualquier sitio. Por lo tanto, la definición de un modelo de probabilidad que describa la aleatoriedad de la pérdida es una decisión que se considera razonable y apropiada, pero es inevitablemente arbitraria. El modelo más ampliamente usado corresponde a una distribución Beta, propuesta por Anne Kiremidjian y otros autores en el desarrollo del documento ATC-13 y su comentario ATC-13-1 (ATC, 1985, 2002), cuyo objetivo era la definición de modelos de probabilidad para el daño causado por terremotos en California. Desde entonces, el uso de la

distribución Beta como modelo de probabilidad de la pérdida se ha generalizado a nivel mundial para todos los peligros y todo tipo de elementos expuestos, al ser un modelo cuyo uso es práctico al cumplir los siguientes criterios:

- Describe una variable aleatoria continua dentro del intervalo real $[0,1]$.
- Se define únicamente con dos parámetros (α y β).
- Admite múltiples formas como función de los valores de sus parámetros.

La función de densidad de probabilidad (f_p) de la distribución Beta se presenta a continuación.

$$f_p = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot p^{\alpha-1} \cdot (1-p)^{\beta-1} \quad \text{Ecuación 24}$$

en donde $\Gamma(\cdot)$ es la función *Gamma*. Dado que se trata de una distribución de dos parámetros, se requiere de dos momentos de probabilidad para caracterizarla. Esto implica que los modelos de vulnerabilidad deben dar cuenta de, por lo menos, dos momentos de probabilidad. Es usual definir modelos de vulnerabilidad en términos del valor esperado ($E(p)$) y varianza ($Var(p)$) de la pérdida. De esta manera, es posible determinar el valor de los parámetros α y β mediante la aplicación del método de los momentos:

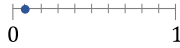

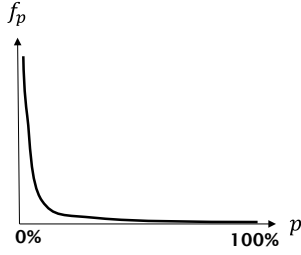


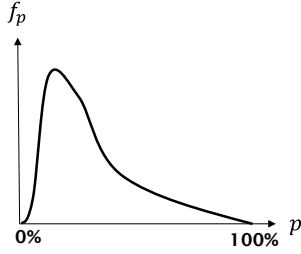

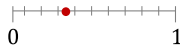
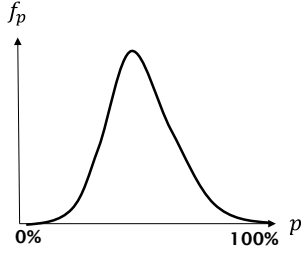


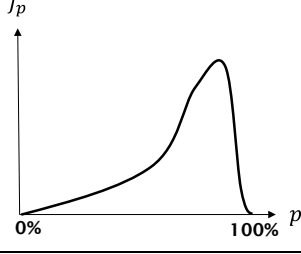

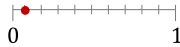
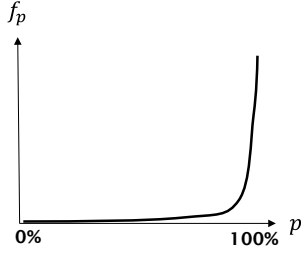
$$\alpha = \frac{1 - (1 + C^2) \cdot E(p)}{C^2} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\beta = \frac{\alpha \cdot (1 - E(p))}{E(p)} \quad \text{Ecuación 26}$$

En donde C es el coeficiente de variación (i.e. $C = \sqrt{Var(p)}/E(p)$). La manera como cambia de forma la distribución Beta depende entonces de los valores de los momentos de probabilidad que se estiman por medio de los modelos de vulnerabilidad. Como se mencionó, la capacidad de la distribución Beta de alterar su forma dentro del intervalo en el cual se define es uno de los criterios por los cuales es ampliamente usada en modelación del riesgo catastrófico. La Tabla 10 ilustra las formas esperadas de la distribución Beta ante diferentes combinaciones de valor esperado y varianza para la pérdida. La tabla incluye una descripción general de lo esperado ante eventos de amenaza de diferente nivel de intensidad⁵, una ilustración de cantidades para el valor esperado y varianza dentro del intervalo $[0,1]$, y una ilustración de la forma esperada de la distribución Beta. Puede concluirse que la distribución Beta se ajusta apropiadamente a las formas como se espera se distribuya la pérdida ante eventos de diferentes características.

⁵ En la Tabla 10 se describen niveles lingüísticos de intensidad con el objetivo de ilustrar el concepto. Sin embargo, en la modelación de la vulnerabilidad los momentos de probabilidad de la pérdida se indexan siempre a medidas físicas de intensidad.

Tabla 10. Ilustración de la variación de la distribución Beta ante eventos de diferente nivel de intensidad.

Descripción	Momentos de probabilidad	Distribución Beta
<p><u>Evento de muy baja intensidad:</u> Se espera un valor bajo de pérdida con una dispersión baja. Es decir, si la intensidad es muy baja se sabe que la pérdida será baja sin mucha variabilidad. La distribución exhibe un comportamiento exponencial negativo, con un rápido decrecimiento. Es decir que la mayor densidad de probabilidad se concentra cerca de pérdida cero, como es de esperarse ante un intensidad muy baja.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de intensidad baja:</u> Aumenta el valor esperado de la pérdida y también aumenta su varianza (es decir, la pérdida es más incierta). La distribución es más ancha, centrada más a la derecha, pero aún sesgada hacia pérdidas bajas</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de intensidad intermedia:</u> El valor esperado de la pérdida es mucho mayor y la varianza es también la mayor posible. La distribución es ahora simétrica, con forma de campana, y lo más ancha posible, indicando que nos encontramos en el punto de mayor variabilidad posible para la pérdida.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de intensidad alta:</u> El valor esperado de la pérdida aumenta pero su varianza disminuye debido a que ante altas intensidades es cada vez menos incierto un nivel de daño elevado. La distribución empieza a sesgarse a la derecha hacia valores grandes de pérdida, con algo de densidad en pérdidas bajas, pero muy concentrada hacia grandes daños.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de muy alta intensidad:</u> El valor esperado de la pérdida es muy alto y su varianza pequeña debido a que no existe mucha incertidumbre acerca del nivel de daño para una intensidad muy alta. La distribución adquiere una forma de función exponencial, con un rápido crecimiento en los valores de densidad, indicando que es casi seguro que las pérdidas sean muy elevadas.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	

4.2 Funciones de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad son una representación matemática de la vulnerabilidad física, que de hecho se compone de dos funciones diferentes: una función que describe la variación del valor esperado de la pérdida con la intensidad del fenómeno y otra que describe la variación de la varianza. Las funciones de vulnerabilidad son el modelo de vulnerabilidad preferido para bienes inmuebles o elementos de infraestructura en evaluaciones de riesgo catastrófico debido a que describen de manera apropiada la pérdida; es decir, su incorporación en el modelo no requiere de ningún preproceso.

La forma de las funciones de valor esperado y varianza no es totalmente libre. En general debe cumplirse lo ilustrado en la Tabla 10, es decir, la función de valor esperado es necesariamente creciente, mientras que la función de varianza debe ser primero creciente y después decreciente para dar cuenta de forma apropiada de su variabilidad esperada con la intensidad del fenómeno. Las formas funcionales más usadas en la literatura para describir funciones de vulnerabilidad son las propuestas en el documento ATC-13 (ATC, 1985, 2002), las cuales describen la variación del valor esperado y varianza de la pérdida ante cualquier medida física de intensidad (a). Para el valor esperado, se sabe que la función debe ser creciente, pero su tasa de crecimiento se asume variable a medida que la intensidad aumenta:

$$E(p) = 1 - e^{-\ln\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^\varepsilon} \quad \text{Ecuación 27}$$

En donde a_0 corresponde a la intensidad que produce un valor esperado de pérdida del 0.5 y ε es un exponente que controla la pendiente de la curva para la intensidad a_0 .

Existe poca información para determinar la varianza de la pérdida. En este caso se asume, como se ilustra en la Tabla 10, que cuando el valor esperado de la pérdida es muy bajo la varianza también lo es. De igual forma, cuando el valor esperado de la pérdida es muy alto, la varianza es de nuevo muy baja. Para valores intermedios es difícil precisar, con bases empíricas, cuánto vale la varianza de la pérdida. Para modelar la variación de la varianza de la pérdida se emplea comúnmente la siguiente expresión (ATC, 1985, 2002):

$$Var(p) = Q \cdot (E(p))^{r-1} \cdot (1 - E(p))^{s-1} \quad \text{Ecuación 28}$$

En donde Q y s se definen como:

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^{r-1}(1 - D_0)^{s-1}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$s = \frac{r-1}{D_0} - r + 2 \quad \text{Ecuación 30}$$

En donde V_{max} es la varianza máxima, D_0 es el nivel de daño para el que ocurre esta varianza máxima y r es un exponente que determina la forma de la función (usualmente se usa $r = 3$). La Figura 50 muestra una ilustración de una función de vulnerabilidad. Nótese las formas de las funciones de valor esperado y varianza.

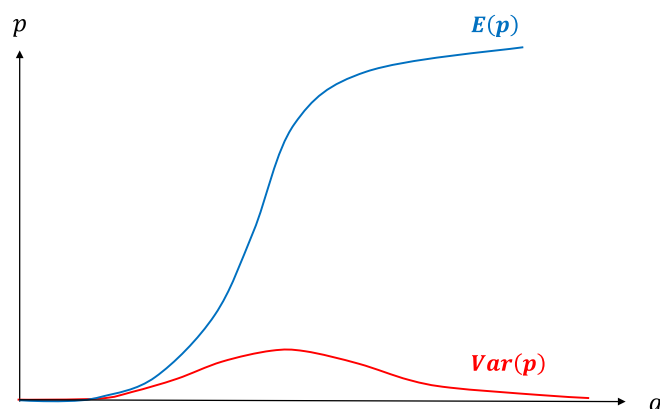


Figura 50. Ilustración de una función de vulnerabilidad

4.3 Tipologías consideradas

Los tipos constructivos empleados cambian según el fenómeno considerado. Incluso dentro de esta misma evaluación por huracán, es importante diferenciar tipos constructivos que capturen las características relevantes de resistencia ante el viento o ante la marea de tormenta, diferenciando apropiadamente para ambos efectos. Por ejemplo, en el caso de la resistencia al viento huracanado, lo más significativo es la condición del revestimiento de la edificación, es decir su cubierta y fachada, diferenciando si se trata de una cubierta liviana o pesada, y una fachada rígida o flexible. Por otra parte, para la marea de tormenta, juega un papel importante la altura del edificio y el material de la construcción, dado que algunos materiales son más susceptibles al daño por estas inundaciones costeras que otros. La Tabla 11 presenta las variables seleccionadas que mejor describen el daño para cada efecto de los huracanes, con su correspondiente descripción.

Tabla 11. Variables que describen la susceptibilidad al daño en edificaciones ante huracanes

Efecto de los huracanes	Variable descriptora	Posibles valores	Descripción
Viento	Tipo de cubierta	Liviana	Cubiertas livianas en teja de zinc o termoacústica, sobre cerchas de madera o guadua y correas en madera o celosía.
		Pesada	Cubiertas pesadas en teja de barro, sobre cerchas de madera y correas en madera o celosía.
		Concreto	Losa de concreto reforzado.
	Tipo de fachada	Rígida	Muros exteriores con baja capacidad de deformación ante presiones laterales (por ejemplo, mampostería, adobe)
		Flexible	Muros exteriores con intermedia o alta capacidad de deformación ante presiones laterales (por ejemplo, madera, bahareque)
	Categoría socioeconómica	Alta – Media - Baja	Asociada al estrato socioeconómico del predio (Baja: 1 y 2; Media: 3 y 4; Alta: 5 y 6)
Marea	Número de pisos	1-15	-
	Material de la estructura	Tierra	Adobe, tapia pisada, bahareque, u otros materiales de tierra.
		Madera	Estructura principal en pórticos o paneles de madera.
		Desecho	Estructura conformada por una diversidad de materiales sin uniformidad.
		Mampostería	Estructura de muros de mampostería simple, confinada o reforzada.

		Concreto y acero	Estructura principal en pórticos de concreto o acero, con o sin riostras o muros.
	<i>Categoría socioeconómica</i>	Alta – Media - Baja	Asociada al estrato socioeconómico del predio (Baja: 1 y 2; Media: 3 y 4; Alta: 5 y 6)

4.4 Vulnerabilidad al viento

Una estructura dentro de un campo de viento está sujeta a fuerzas aerodinámicas, las cuales se distribuyen sobre y a través de la estructura dependiendo de sus características. Estas fuerzas aerodinámicas ocasionan presiones y succiones sobre los elementos que recubren la estructura. Estos elementos transfieren las fuerzas a los elementos estructurales resistentes. El viento genera una presión directa sobre la fachada anterior. Por otro lado, las ráfagas de viento se desvían por ambos costados y por la cubierta, ocasionando fuerzas de succión en la cubierta, las fachadas laterales y en la fachada posterior.

Si el viento logra romper las ventanas y puertas de la fachada anterior, entrará violentamente al interior de la edificación, incrementando las fuerzas de succión en las paredes y cubierta del inmueble, ocasionando daños severos con posibilidades de colapso parcial o total de la estructura. Los daños que típicamente se presentan debidos a vientos fuertes, son los siguientes:

- Caída de recubrimientos ligeros en edificios.
- Rotura de ventanas.
- Daños a los grandes vitrales en la fachada de construcciones.
- Pérdida de cubiertas ligeras y domos, lo cual ocasiona daños al interior de las construcciones.
- Daño a plafones y muros de material ligero en interiores.
- Colapso de cubiertas de madera y palma, lo cual ocasiona el daño a contenidos.
- Daño importante en elementos de recubrimiento ligeros en lámina para estructuras de acero
- Colapso de anuncios comerciales, los cuales a su vez afectan construcciones cercanas.
- Socavación de cimentaciones

En esta evaluación se adopta el marco general dado por el modelo HAZUS MH 2.1 (FEMA Federal Emergency Management Agency, n.d.), que consolida la investigación disponible sobre vulnerabilidad por viento. En resumen, las funciones de vulnerabilidad consideradas en este trabajo han sido obtenidas, por otros autores e investigadores a lo largo de muchos años, mediante la aplicación de las siguientes etapas, para cada sistema estructural de estudio:

- Definir la geometría y las características físicas de cada tipo constructivo, en términos de su cubierta, paredes externas, ventanas y otros elementos susceptibles a daños por vientos fuertes.
- Estimar la resistencia aproximada y la capacidad de los componentes individuales, para cada tipo constructivo, de resistir la fuerza de presión o succión impuesta por el viento. En general, esta estimación se hace para materiales con un alto nivel de diseño estructural.
- Determinar la distribución de la máxima presión del viento sobre diferentes componentes para cada tipo constructivo, para varios niveles de velocidad del viento máximo de referencia (que corresponde al parámetro de intensidad de la amenaza).
- Estimar la secuencia del daño esperado según la relación entre capacidad y demanda de los componentes críticos.

- Evaluar el daño total para cada nivel de intensidad, en términos del daño medio esperado, teniendo en cuenta la participación que el daño representa con respecto al valor total de la edificación.

La función de valor esperado de una curva de vulnerabilidad por viento es:

$$E[\beta] = E \left[1 - 0.5 \left(\frac{V}{\gamma} \right)^\rho \right] \quad \text{Ec. 1}$$

en donde $E[\beta]$ es el valor esperado medio del daño en porcentaje, V es la velocidad del viento, y ρ es el parámetro de curvatura que se ajusta según la forma final de la curva y γ es la intensidad para $E[\beta] = 0.5$, y son los parámetros específicos que definen la forma de las funciones de vulnerabilidad para los diferentes tipos estructurales. En la Figura 4-51 se presentan las funciones de vulnerabilidad usadas para los sistemas estructurales definidos en este trabajo. Cabe anotar que para la modelación de marea de tormenta se emplean las mismas funciones de inundación ya presentadas.

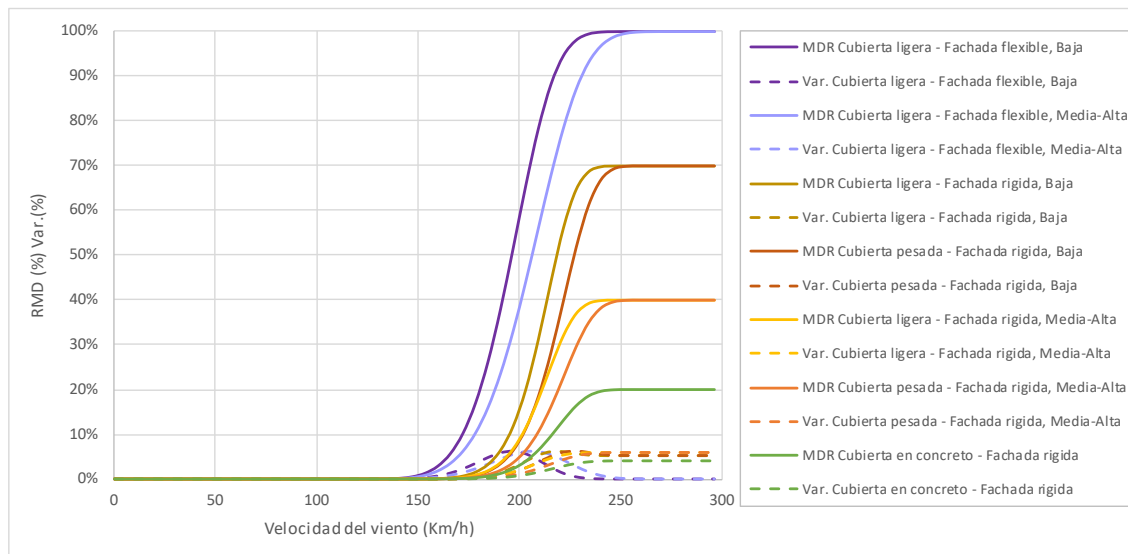


Figura 4-51. Funciones de vulnerabilidad de viento fuerte para edificaciones

4.5 Vulnerabilidad a la marea de tormenta

La marea de tormenta se modela como una inundación costera producto de la sobreelevación del nivel del mar. Por esta razón, el modelo de vulnerabilidad empleado corresponde a un modelo de inundaciones para edificaciones. Para definir la vulnerabilidad de edificaciones se emplean relaciones matemáticas definidas por la FEMA Federal Emergency Management Agency de los Estados Unidos dentro del modelo de cálculo HAZUS. Considerando una forma general para edificaciones de varios niveles, y suponiendo que los valores y la densidad de contenidos se mantendrán constantes en todos los pisos, se establece la siguiente ecuación para el cálculo del daño (δ) ante cualquier altura de inundación. Cabe anotar que la variable daño (δ) definida en HAZUS es equivalente a la pérdida relativa (pérdida dividida por el valor de reposición del inmueble)

$$\delta = \frac{\delta_{N1max}(N_{st} - 1)}{N_T} + \frac{\delta_{N1}(\tilde{t})}{N_T}$$

Ec. 2

en donde δ_{N1max} es el daño máximo de la función para un nivel para la profundidad máxima, $\delta_{N1}(\tilde{t})$ es el daño para una profundidad relativo sobre los niveles completamente inundados, $\tilde{t} = t - h_N \cdot (N_{st} - 1)$ es la profundidad relativa sobre los niveles inundados, h_N es la altura de entrepiso, $N_{st} = Ent_{SUP} \left(\frac{t}{h_N} \right)$ es el nivel donde se encuentra la superficie de inundación del agua, definido como el valor entero superior de la relación indicada, y N_T es el número total de niveles.

En el desarrollo de funciones de vulnerabilidad para inundaciones se tuvo en cuenta el número de pisos, la altura de entrepiso y el material de construcción, a partir de los cuales se definen los parámetros de daño para una profundidad relativa, $\delta_{N1}(\tilde{t})$, y el daño máximo para la profundidad máxima δ_{N1max} .

De acuerdo con los anteriores parámetros y aplicando la Ec. 2 se pueden obtener las curvas de daño para cualquier número de niveles en función de las curvas obtenidas para un nivel. A continuación, se presentan las funciones de vulnerabilidad que relacionan la pérdida económica esperada sobre el valor de reposición de los elementos expuestos con la intensidad del fenómeno, que corresponde a profundidad de inundación. En la Figura 4-52 se presenta la curva para edificaciones en tierra, madera o desecho, en la Figura 4-53 se presentan las curvas para edificaciones de mampostería y en la Figura 4-54 se presentan las curvas para edificaciones en concreto.

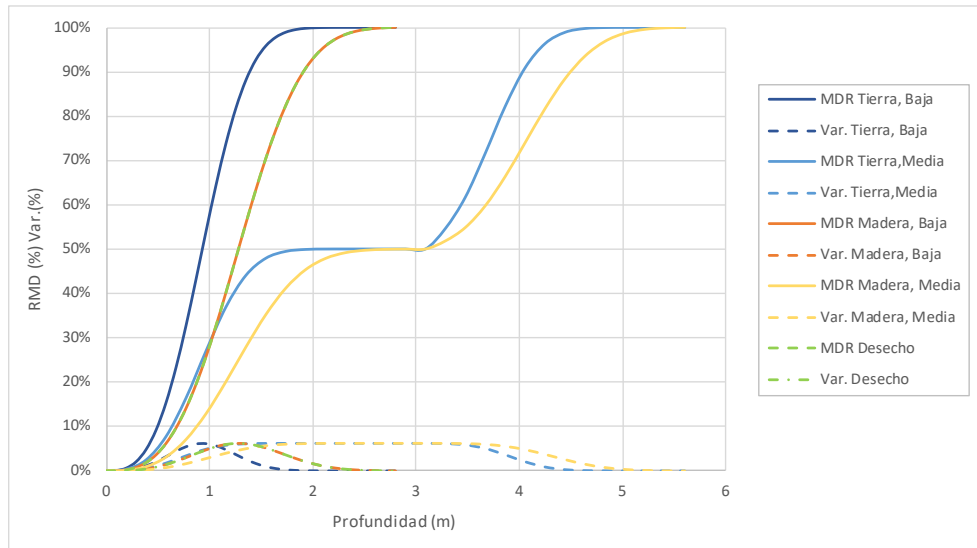


Figura 4-52. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en tierra, desecho o madera

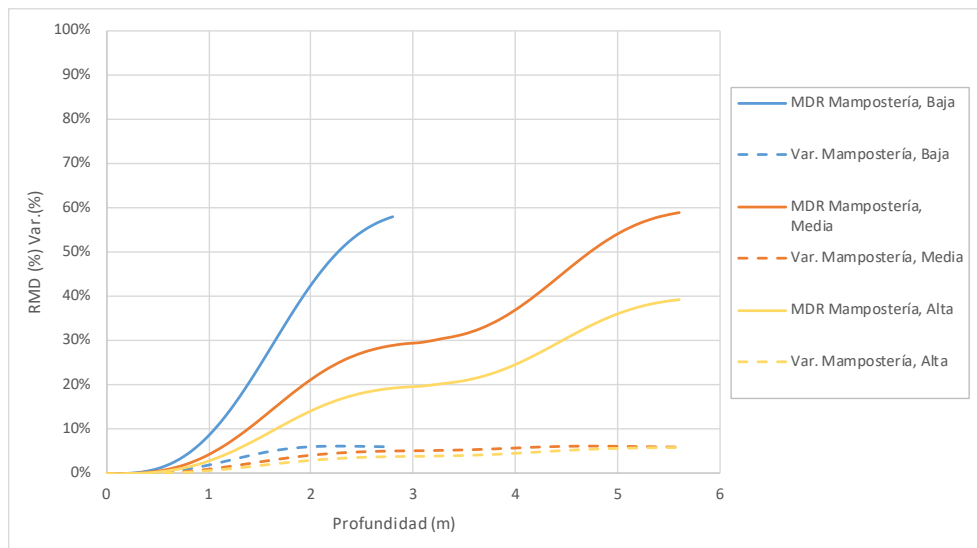


Figura 4-53. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en mampostería

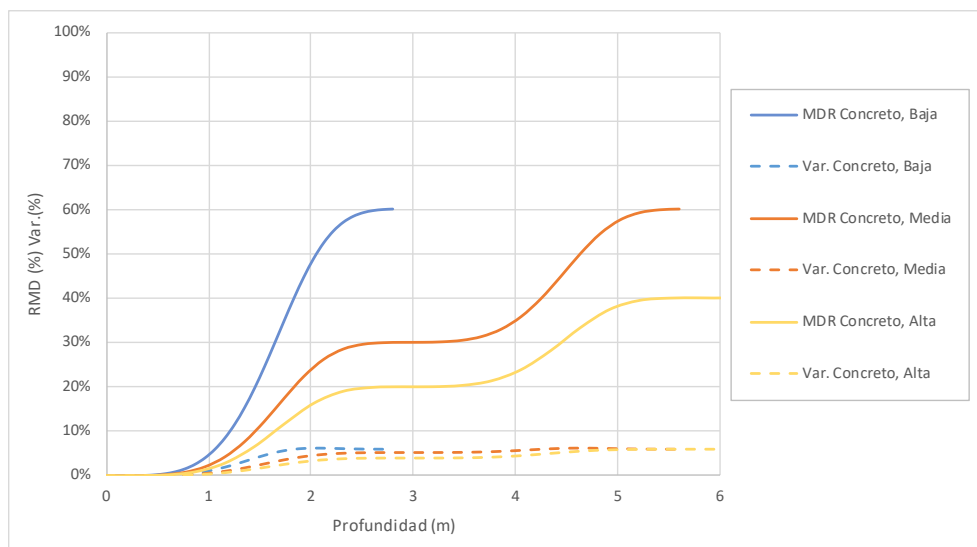


Figura 4-54. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en concreto

5 EVALUACIÓN DEL RIESGO

El riesgo se determina mediante la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad, en la ubicación ocupada por los elementos expuestos y para la totalidad de los mismos. Como se ha mencionado anteriormente, en el cálculo probabilista de las pérdidas la amenaza y la vulnerabilidad están representadas también de manera probabilista. La amenaza tiene una representación probabilista tanto temporal como espacial. La ocurrencia en el tiempo de los escenarios de amenaza se modela como un proceso de Poisson, lo que conlleva a modelar mediante una distribución de probabilidad exponencial el tiempo que transcurre entre los escenarios.

Las incertidumbres asociadas a la amenaza y a la vulnerabilidad son entonces definidas en su propia naturaleza; temporal y espacial para la amenaza y dependiente de la intensidad para la vulnerabilidad. De esta manera, el principal resultado del modelo es una distribución de probabilidad específica de la pérdida para cada escenario de riesgo. La función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento j , condicional a la ocurrencia del escenario i , $f(p_j|E_i)$, se calcula como,

$$f(p_j|E_i) = \int_0^{\infty} f(p_j|s)f(s|E_i)ds \quad 1$$

en donde el primer término de la integral tiene que ver con la vulnerabilidad ($f(p_j|s)$, la densidad de probabilidad de la pérdida dada una intensidad s) y la segunda parte tiene que ver con la amenaza ($f(s|E_i)$, la densidad de probabilidad de la intensidad, dada la ocurrencia de un escenario).

La pérdida total del escenario i corresponde a la suma de todas las pérdidas individuales (p_j) de los elementos expuestos. Dado que los sumandos son variables aleatorias, debe usarse la aritmética correcta para determinar la pérdida del escenario i . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables p_j como se indica a continuación.

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad 2$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} cov(p_k, p_j) \quad 3$$

en donde $E(p|E_i)$ es el valor esperado de la pérdida del escenario i , $\sigma^2(p|E_i)$ es su varianza, NE es el número total de elementos expuestos, $E(p_j)$ es el valor esperado de la pérdida en el elemento j , $\sigma^2(p_j)$ es su varianza, y $cov(p_k, p_j)$ es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. La ecuación 47 puede escribirse entonces como,

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \rho_{k,j} \sigma(p_k) \sigma(p_j) \quad 4$$

De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia del escenario i .

El riesgo es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* la cual especifica las frecuencias de ocurrencia de eventos en que se exceda un valor específico de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como *tasa de excedencia*, y se calcula de la siguiente manera,

$$v(p) = \sum_{i=1}^N Pr(P > p | E_i) \cdot F_A(E_i) \quad 5$$

en donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , N es el número total de escenarios de amenaza, $F_A(E_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i , y $Pr(P > p | E_i)$ es la probabilidad de que p sea excedida dado que ocurrió el escenario i . La suma cubre todos los escenarios de amenaza que pueden generar pérdidas. El inverso de $v(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr . La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de las pérdidas.

Es importante hacer notar que la curva de excedencia de pérdidas no tiene incertidumbre. Es común asociar los resultados de un modelo probabilista de riesgo a un nivel de confianza o de variabilidad de los mismos. Pues bien, las tasas de excedencia calculadas en un modelo probabilista de riesgo consideran directamente la incertidumbre en las pérdidas, por lo cual dichas tasas de excedencia no pueden tener una incertidumbre o variabilidad propia. Esto debido a que, en términos matemáticos, son una medida de probabilidad calculada para una cantidad de pérdida específica. En el contexto de la modelación del riesgo, la pérdida es la variable aleatoria, no las tasas anuales de excedencia.

5.1 Métricas del riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

5.1.1 La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad \text{Ecuación 6}$$

Desde el conjunto de evento de pérdida, puede determinarse la PAE como,

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P | E_i) F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 7}$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

5.1.2 La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. El periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia de pérdidas,

$$Tr(p) = \frac{1}{v(p)} \quad \text{Ecuación 8}$$

En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Marulanda (2013).

5.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 12 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 5 municipios, tanto para el clima actual como para el clima RCP 8.5. La Figura 55 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 56 muestra las curvas de PML de cada municipio, para el clima base y el clima RCP8.5.

Tabla 12. Pérdidas Anuales Esperadas por huracán

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	PAE (clima base)		PAE (RCP 8.5)	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
San Andrés	\$ 3,185,480	\$ 19,017	5.97	\$ 30,262	9.5
Providencia	\$ 423,783	\$ 3,581	8.45	\$ 6,891	16.26
Manaure	\$ 1,380,971	\$ 3,729	2.7	\$ 5,800	4.2
Uribia	\$ 2,700,357	\$ 4,861	1.8	\$ 6,751	2.5
Riohacha	\$ 5,909,352	\$ 1,773	0.3	\$ 4,137	0.7

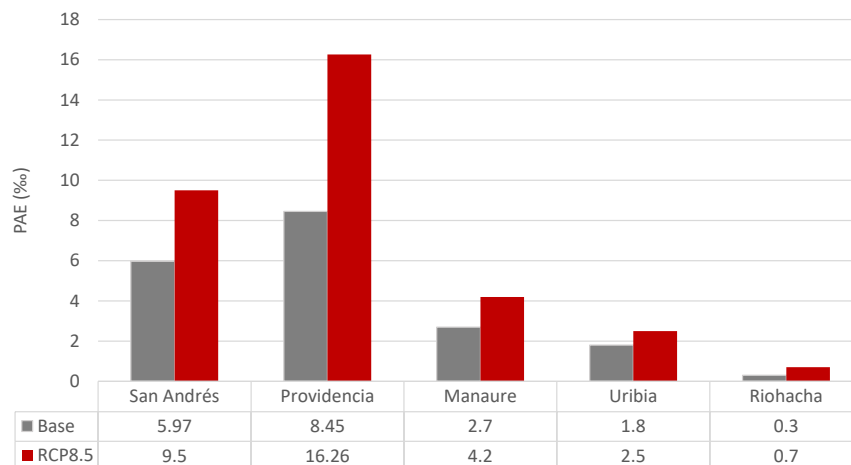
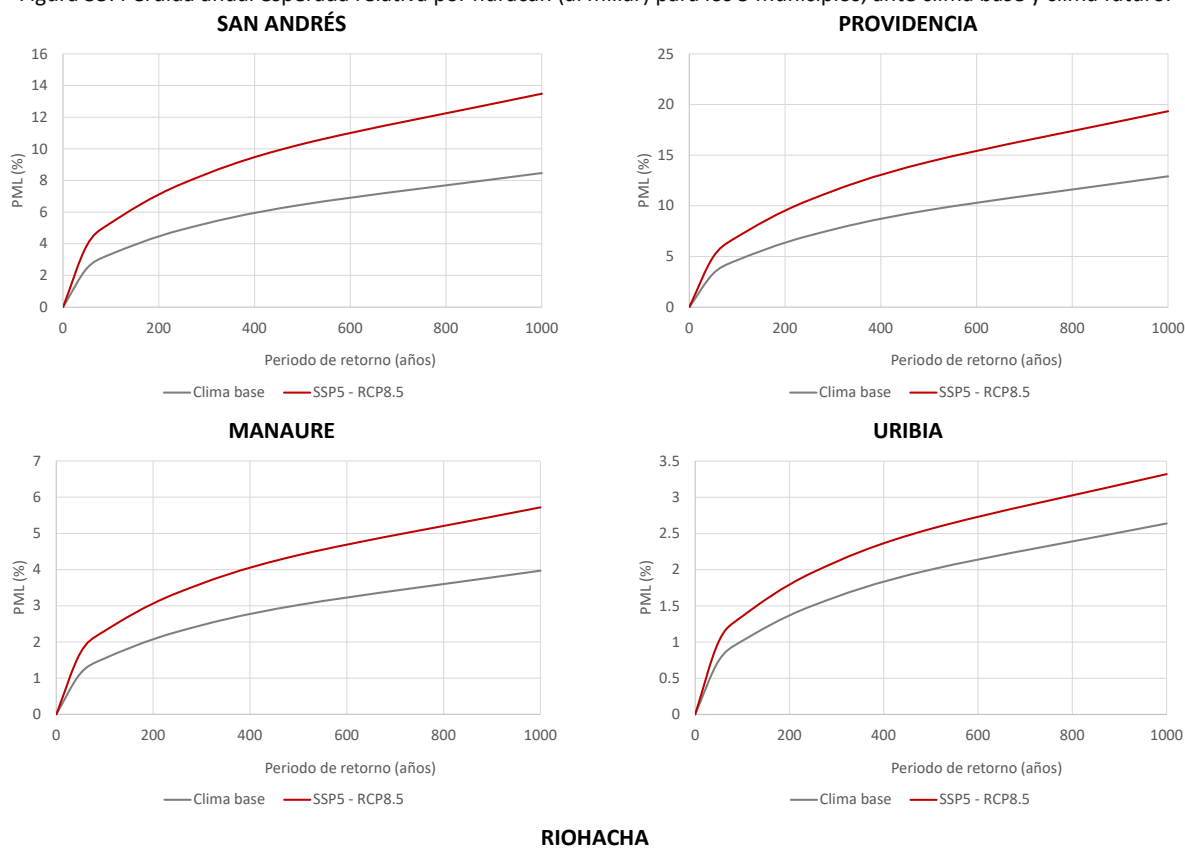


Figura 55. Pérdida anual esperada relativa por huracán (al millar) para los 5 municipios, ante clima base y clima futuro.



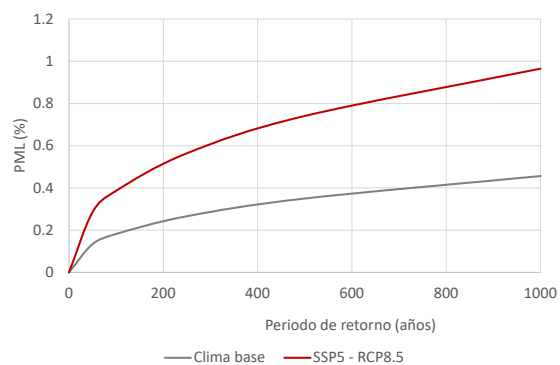


Figura 56. Curvas de PML relativa por huracán (en porcentaje) para los 5 municipios, ante clima base y clima futuro.

Dado que la evaluación se realiza a una escala detallada (edificio a edificio) es posible construir mapas de pérdida anual esperada por ubicación, para cada municipio. Estos mapas se incluyen en el Anexo 1. Así mismo, los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

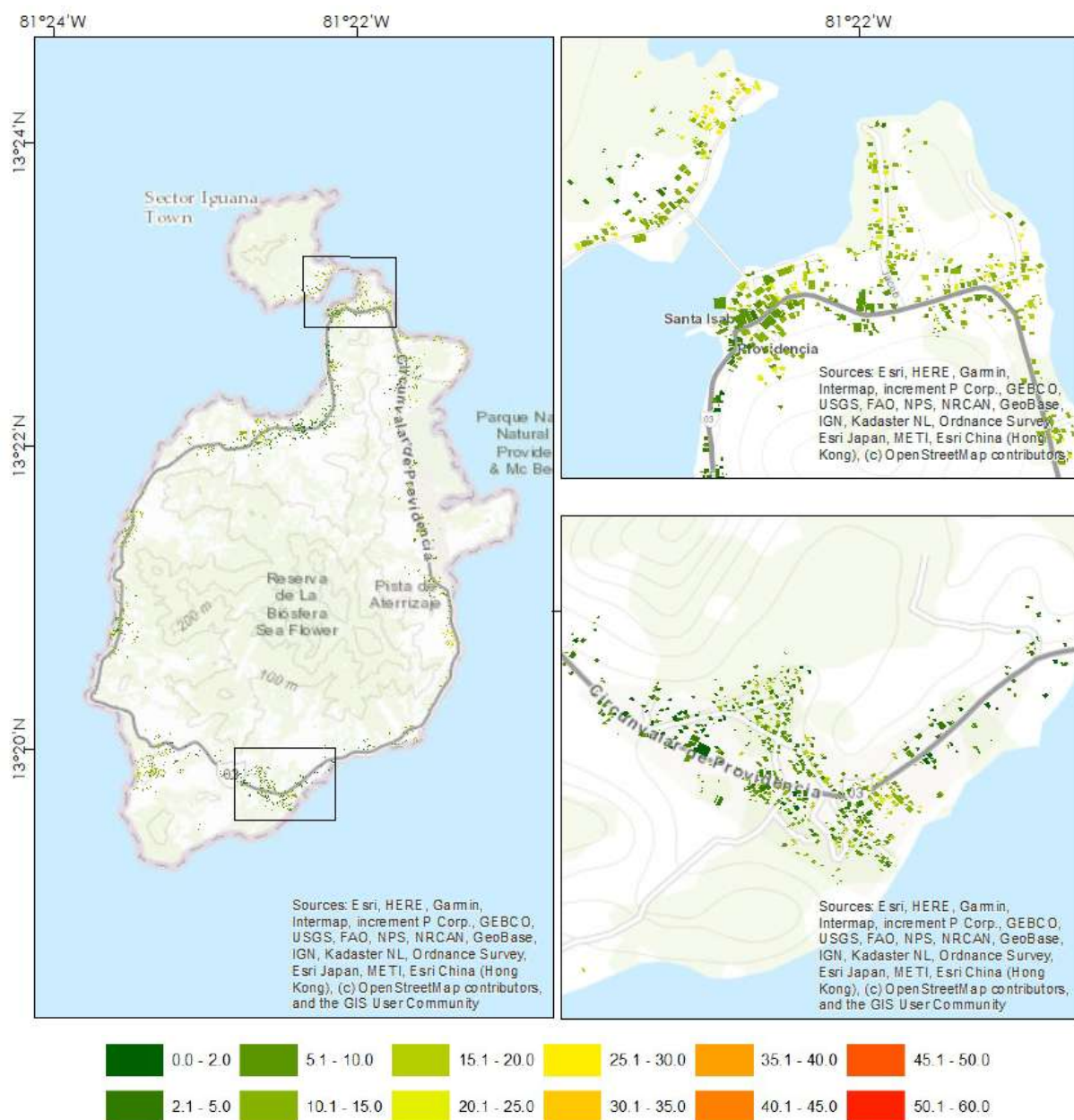


Figura 57. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Providencia ante el clima base.

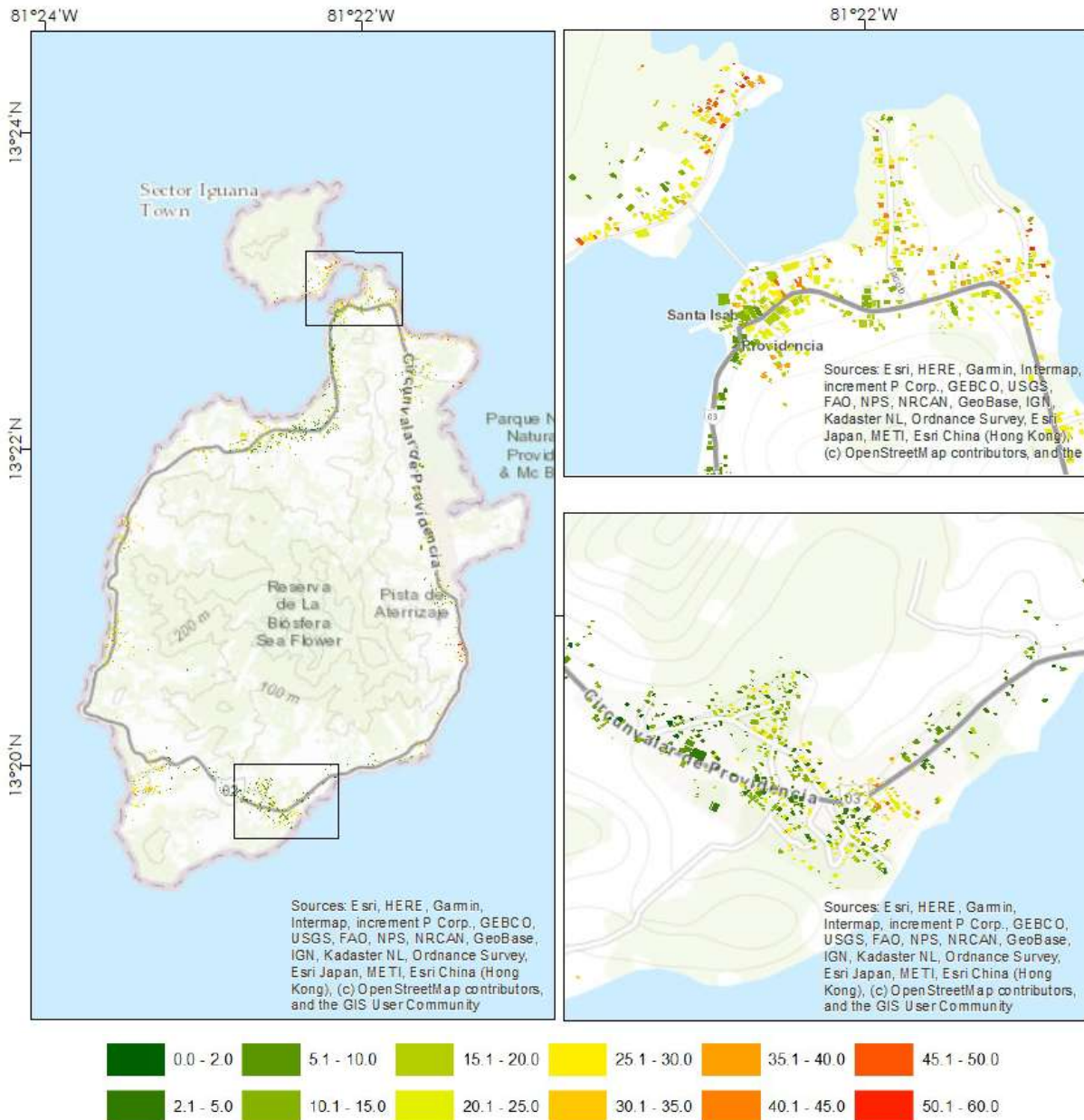


Figura 58. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Providencia ante el clima RCP 8.5.

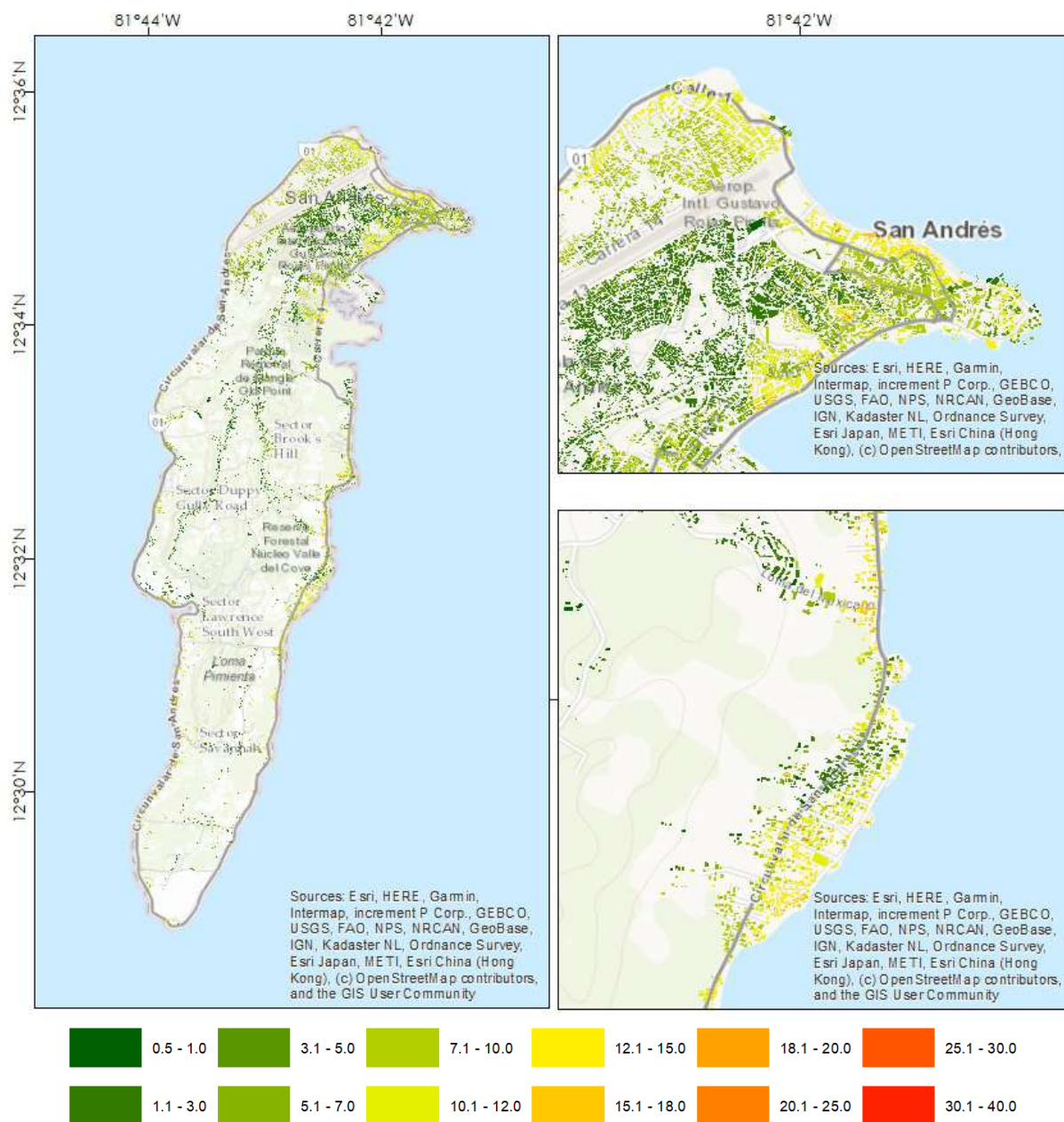


Figura 59. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en San Andrés ante el clima base.

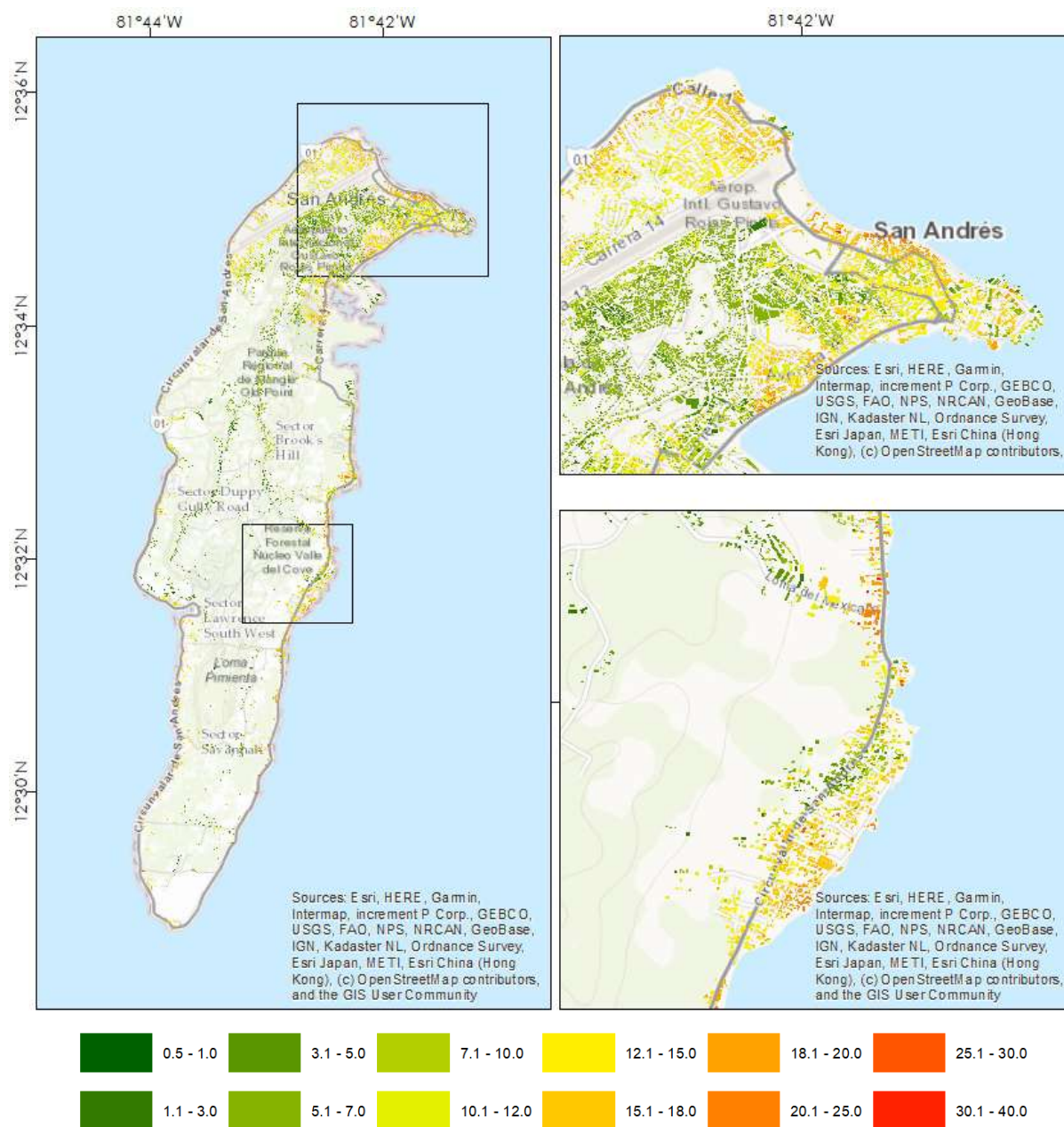


Figura 60. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en San Andrés ante el clima RCP 8.5.

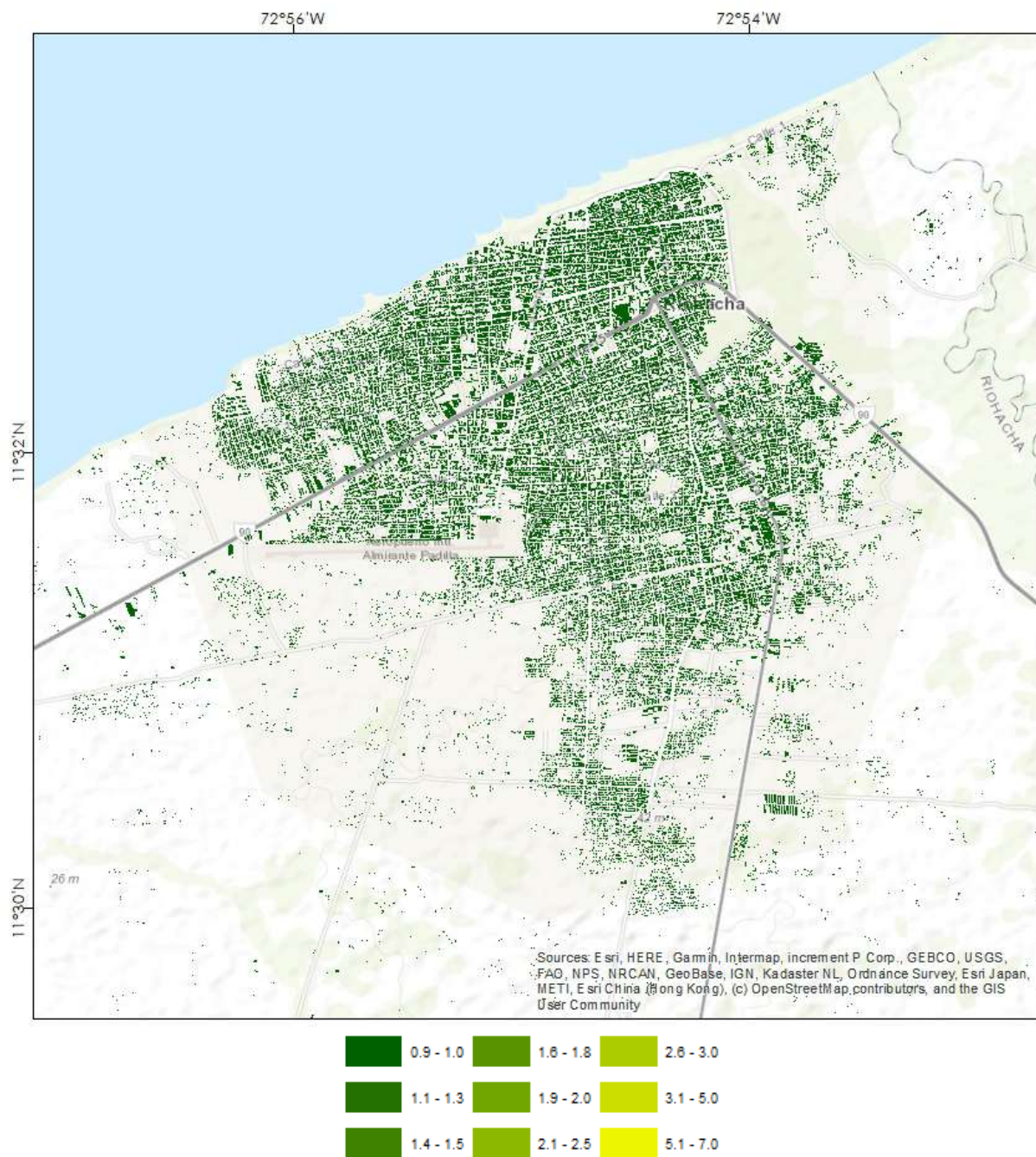


Figura 61. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Riohacha ante el clima base.

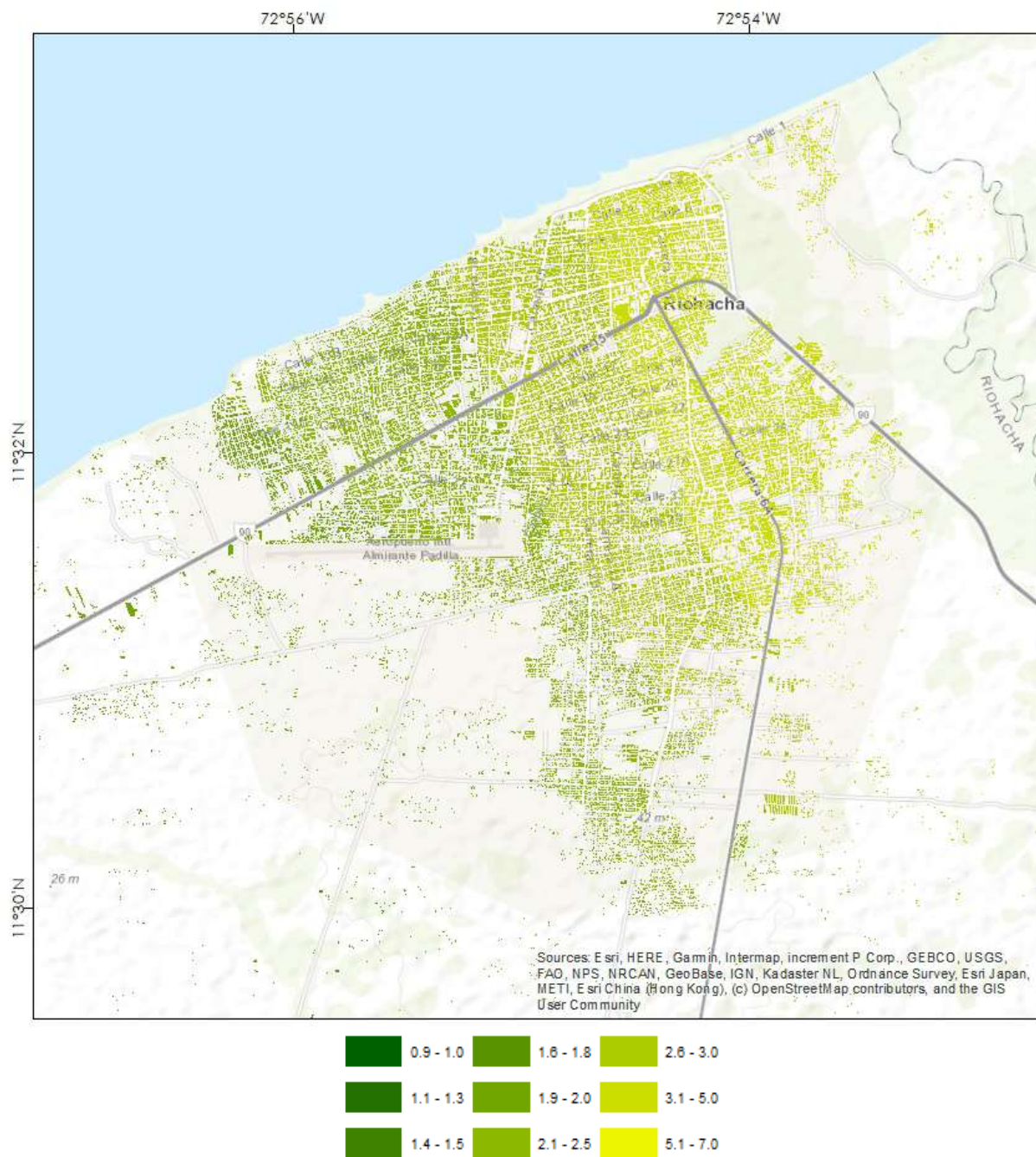


Figura 62. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Riohacha ante el clima RCP 8.5.

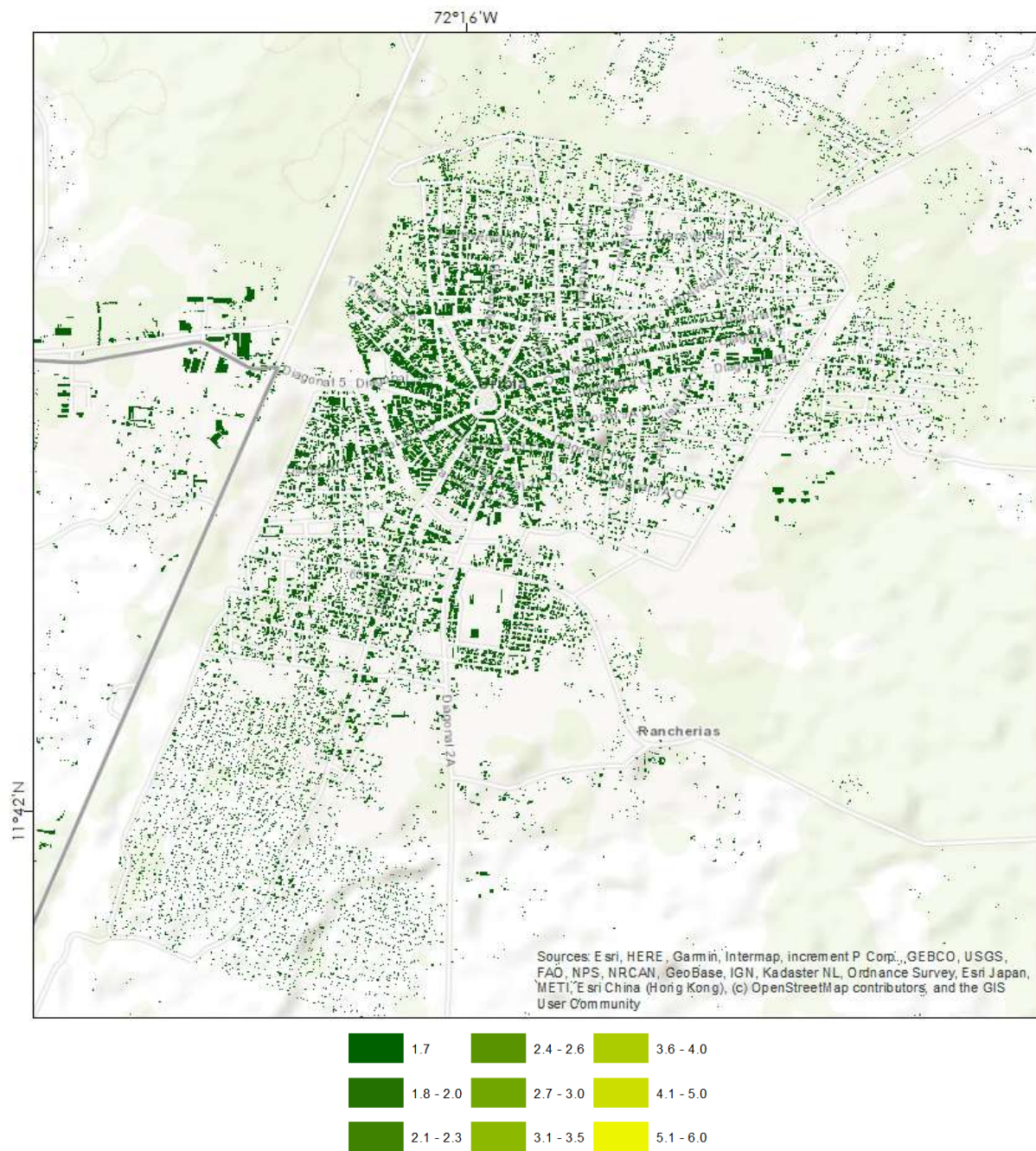


Figura 63. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Uribe ante el clima base.

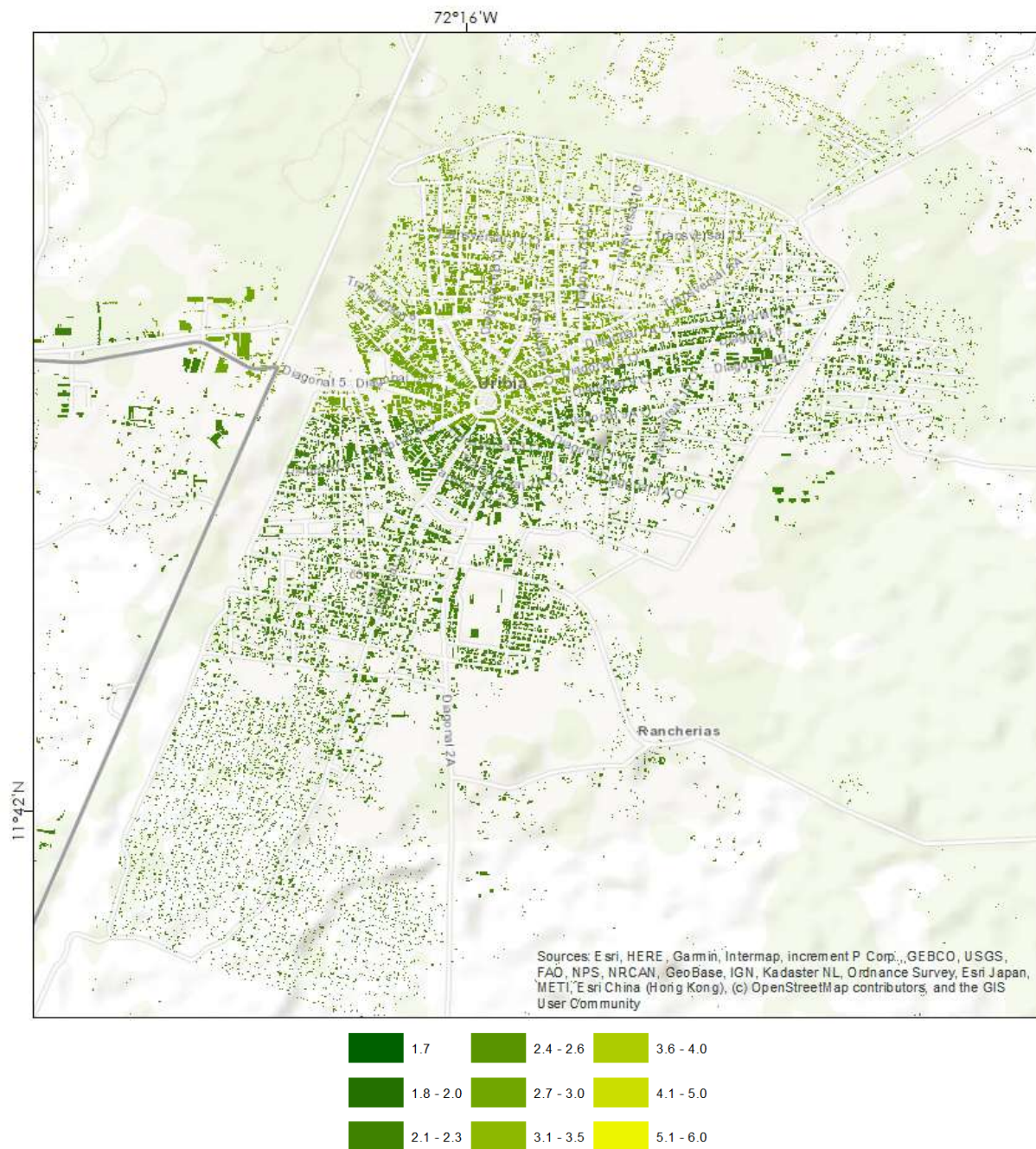


Figura 64. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Uribia ante el clima RCP 8.5.

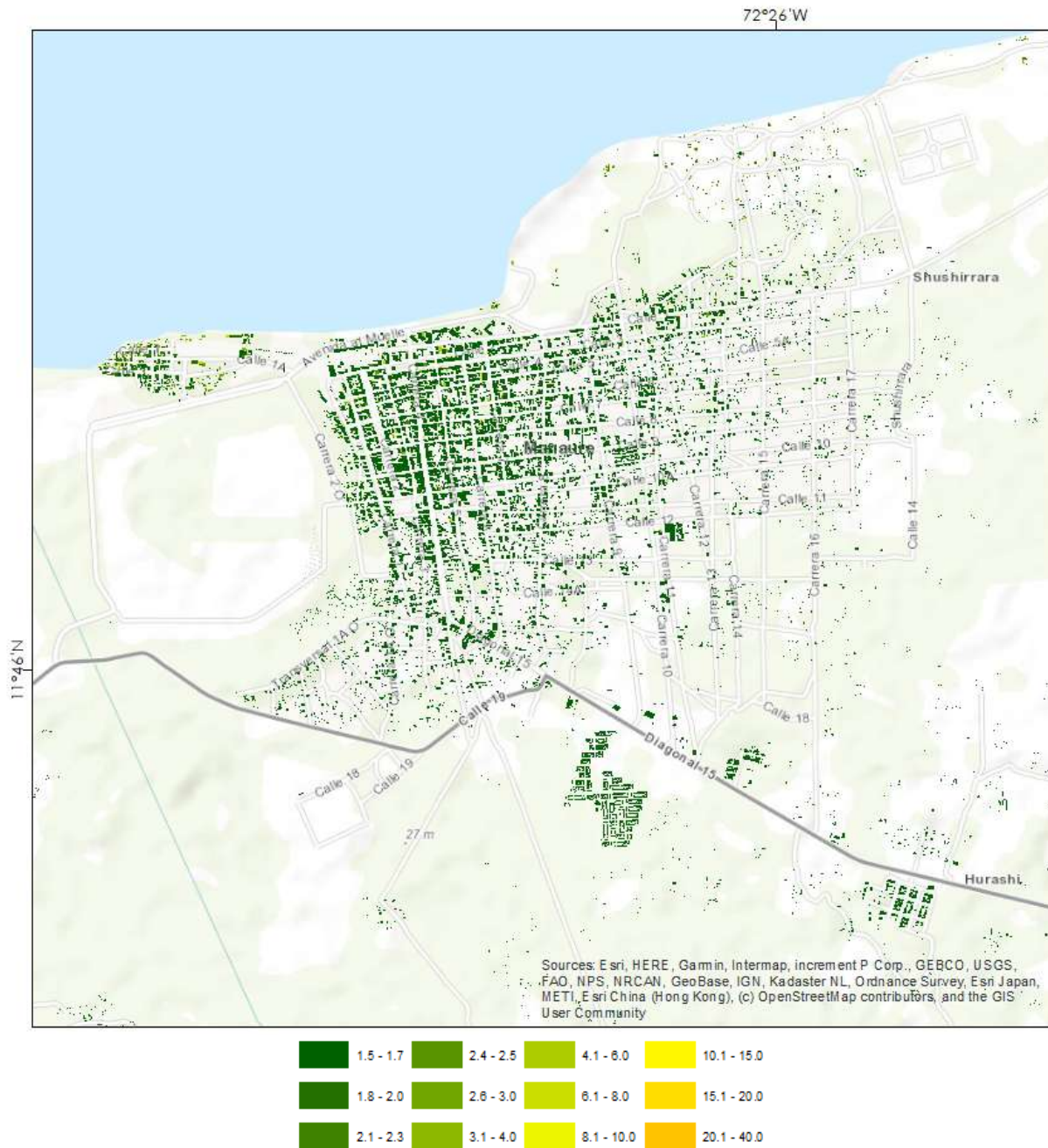


Figura 65. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Manaure ante el clima base.

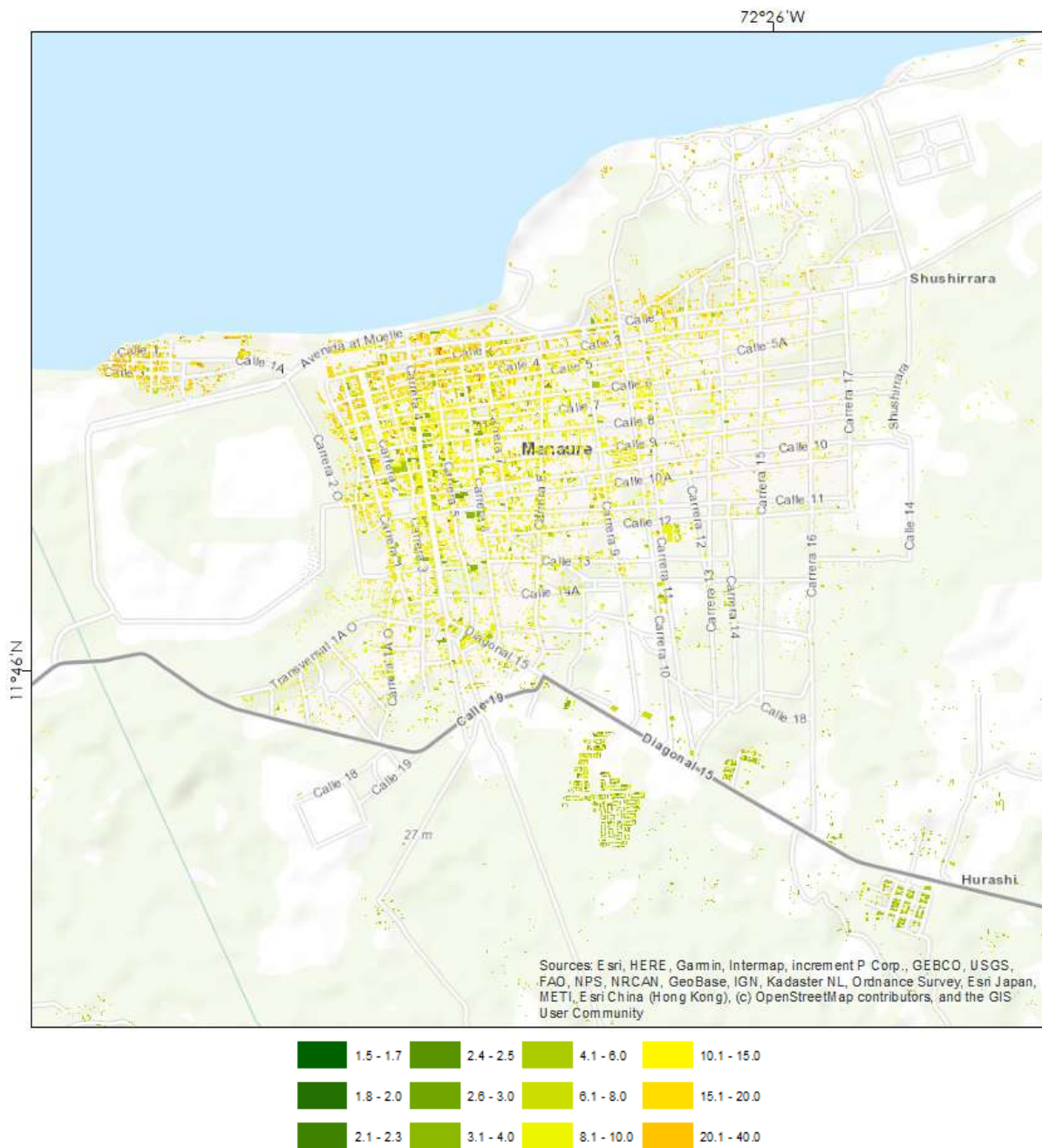


Figura 66. Mapa de PAE relativa (al millar) por huracán a nivel de edificación en Manaure ante el clima RCP 8.5.

6 REFERENCIAS

- Bentsen, M., Olivie, D., Seland, Ø., Toniazzi, T., Gjermundsen, A., Graff, L., Debernard, J., Gupta, A., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Aas, K., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., Karset, I., Landgren, O., Liakka, J., Moseid, K., Nummelin, A., Spensberger, C., Tang, H., Zhang, Z., Heinze, C., Iversen, T., & Schulz, M. (2019). NCC NorESM2-MM model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.506>
- Bernal, G. A., Escovar, M. A., Zuloaga, D., & Cardona, O. D. (2017). Agricultural Drought Risk Assessment in Northern Brazil: An Innovative Fully Probabilistic Approach. In V. Marchezini, B. Wiesner, S. Saito, & L. Londe (Eds.), *Reduction of Vulnerability to Disasters: from Knowledge to Action*. RiMa Ed., pp. 331–356
- Bernal, G., Rincon, D., Escovar, M.A. & Cardona, O. D. (2018). Drought Pro: Computer program for probabilistic drought risk assessment of crops and livestock systems.
- Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M., Meurdesoif, Y., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Hauglustaine, D., Bekki, S., & Marchand, M. (2020). IPSL IPSL-CM6A-LR-INCA model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.13581>
- Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M., Meurdesoif, Y., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Hauglustaine, D., Bekki, S., & Marchand, M. (2021). IPSL IPSL-CM5A2-INCA model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.13641>
- Brovkin, V., Wieners, K., Giorgetta, M., Jungclaus, J., Reick, C., Esch, M., Bittner, M., Legutke, S., Schupfner, M., Wachsmann, F., Gayler, V., Haak, H., de Vrese, P., Raddatz, T., Mauritsen, T., von Storch, J., Behrens, J., Claussen, M., Crueger, T., Fast, I., Fiedler, S., Hagemann, S., Hohenegger, C., Jahns, T., Kloster, S., Kinne, S., Lasslop, G., Kornblueh, L., Marotzke, J., Matei, D., Meraner, K., Mikolajewicz, U., Modali, K., Müller, W., Nabel, J., Notz, D., Peters-von Gehlen, K., Pincus, R., Pohlmann, H., Pongratz, J., Rast, S., Schmidt, H., Schnur, R., Schulzweida, U., Six, K., Stevens, B., Voigt, A., & Roeckner, E. (2019). MPI-M MPIESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 C4MIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.748>
- Byun, Y., Lim, Y., Sung, H., Kim, J., Sun, M., & Kim, B. (2019). NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2241>
- Cardona, O.D., Bernal, G., Rincón, D., Grajales, S., Herrera, S., Gonzalez, D., Acosta, M., Molina, J.F., Villegas, C. 2022. Informe de inicio. Estudio de riesgos climáticos y medidas de adaptación para peligros y sectores priorizados en el Perú en el marco de la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático (ENCC) y el Plan Nacional de Adaptación (PNA). Preparado para BID.
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Danabasoglu, G. (2019). NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2181>
- Danabasoglu, G. (2019). NCAR CESM2-WACCM model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10023>

Dix, M., Bi, D., Dobrohotoff, P., Fiedler, R., Harman, I., Law, R., Mackallah, C., Marsland, S., O'Farrell, S., Rashid, H., Srbinovsky, J., Sullivan, A., Trenham, C., Vohralik, P., Watterson, I., Williams, G., Woodhouse, M., Bodman, R., Dias, F., Domingues, C., Hannah, N., Heerdegen, A., Savita, A., Wales, S., Allen, C., Druken, K., Evans, B., Richards, C., Ridzwan, S., Roberts, D., Smillie, J., Snow, K., Ward, M., & Yang, R. (2019). CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2281>

EC-Earth Consortium (EC-Earth). (2020). EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg-LR model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.643>

EC-Earth3-AerChem: a global climate model with interactive aerosols and atmospheric chemistry participating in CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 14, 5637–5668, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5637-2021>, 2021.

FAO. (2020). Harmonized World Soil Database. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>

Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., ... van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

Hajima, T., Kawamiya, M., Tachiiri, K., Abe, M., Arakawa, O., Suzuki, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Ito, A., Takata, K., & Watanabe, S. (2019). MIROC MIROC-ES2L model output prepared for CMIP6 C4MIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.906>

Horowitz, L., Naik, V., Sentman, L., Paulot, F., Blanton, C., McHugh, C., Radhakrishnan, A., Rand, K., Vahlenkamp, H., Zadeh, N., Wilson, C., Ginoux, P., He, J., John, J., Lin, M., Paynter, D., Ploshay, J., Zhang, A., & Zeng, Y. (2018). NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1404>

Li, L. (2019). CAS FGOALS-g3 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1783>

Lovato, T., & Peano, D. (2020). CMCC CMCC-CM2-SR5 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1362>

Maskrey, A., Cardona, O.D., Bernal, G., Escovar, M. A., Villegas, C., Grajales, S., Rincón, D. (2019). Agricultural Drought Risk: The case of Kazakhstan. Report for the UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific – ESCAP. 2019

O'Connor, F. (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1561>

Olivie, D., Bentsen, M., Seland, Ø., Toniazzi, T., Gjermundsen, A., Graff, L., Debernard, J., Gupta, A., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Aas, K., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., Karset, I., Landgren, O., Liakka, J., Moseid, K., Nummelin, A., Spensberger, C., Tang, H., Zhang, Z., Heinze, C., Iversen, T., & Schulz, M. (2019). NCC NorESM2-LM model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.574>

Panickal, S., Raghavan, K., Gopinathan, P., Narayanasetti, S., Choudhury, A., Singh, M., & Modi, A. (2019). CCCR-IITM IITM-ESM model output data prepared for CMIP6 CMIP/DECK. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.44>

- Rong, X. (2019). CAMS CAMS_CSM1.0 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1399>
- Seferian, R. (2019). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1389>
- Semmler, T., Danilov, S., Rackow, T., Sidorenko, D., Barbi, D., Hegewald, J., Pradhan, H. K., Sein, D., Wang, Q. & Jung, T. (2019). AWI-CM-1.1-MR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP: links to SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585 scenarios. doi: 10.22033/ESGF/CMIP6.376
- Stouffer, R. (2019). U of Arizona MCM-UA-1-0 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2421>
- Swart, N., Cole, J., Kharin, V., Lazare, M., Scinocca, J., Gillett, N., Anstey, J., Arora, V., Christian, J., Jiao, Y., Lee, W., Majaess, F., Saenko, O., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., Winter, B., & Sigmond, M. (2019). CCCma CanESM5-CanOE model output prepared for CMIP6 C4MIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10203>
- Takemura, T. (2019). MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9121>
- Tsai, I., Lee, W., & Hsu, H. (2020). AS-RCEC TaiESM1.0 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9682>
- UNEP-WCMC. (2011). The UK National Ecosystem Assessment: Synthesis of the Key Findings. En Unep-Wcmc. <https://doi.org/10.1177/004057368303900411>
- Voltaire, A. (2019). CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1 model output prepared for CMIP6 CFMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1374>
- Voltaire, A. (2019). CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1-HR model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1385>
- Volodin, E., Mortikov, E., Gritsun, A., Lykossov, V., Galin, V., Diansky, N., Gusev, A., Kostykin, S., Iakovlev, N., Shestakova, A., & Emelina, S. (2019). INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1422>
- Volodin, E., Mortikov, E., Gritsun, A., Lykossov, V., Galin, V., Diansky, N., Gusev, A., Kostykin, S., Iakovlev, N., Shestakova, A., & Emelina, S. (2019). INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1423>
- Webb, M. (2019). MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 CFMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.435>
- YU, Y. (2018). CAS FGOALS-f3-L model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1782>
- Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., & Adachi, Y. (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.633>
- Zhang, F., Wu, T., Shi, X., Li, J., Chu, M., Liu, Q., Yan, J., Ma, Q., & Wei, M. (2019). BCC BCC-CSM2MR model output prepared for CMIP6 C4MIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1723>

