

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-02991

Riesgo de desastres y cambio climático en el sistema de transporte urbano de la Ciudad de Panamá

Amarilis Ulloa
Christian Ross de la Guardia
Eduardo García Alonso
Elsa Cacho Taeño
Esperanza González-Mahecha
María Alejandra Escovar
Mauricio Bayona
Natalia Sampedro Carral

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Cambio Climático

Octubre 2024



Riesgo de desastres y cambio climático en el sistema de transporte urbano de la Ciudad de Panamá

Amarilis Ulloa
Christian Ross de la Guardia
Eduardo García Alonso
Elsa Cacho Taeño
Esperanza González-Mahecha
María Alejandra Escovar
Mauricio Bayona
Natalia Sampedro Carral

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Cambio Climático

Octubre 2024

Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Riesgo de desastre y cambio climático en el sistema de transporte urbano de ciudad de Panamá / Amarilis Ulloa, Christian Ross de la Guardia, Eduardo García Alonso, Elsa Cacho Taeño, Esperanza González-Mahecha, Mauricio Bayona, Natalia Sampedro Carral.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2991)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Natural disasters-Government policy-Panama. 2. Environmental risk assessment-Government policy-Panama. 3. Urban transportation policy-Panama. 4. Climatic changes-Panama. I. Ulloa, Amarilis. II. Ross de la Guardia, Christian. III. García, Eduardo. IV. Cacho Taeño, Elsa. V. González-Mahecha, Esperanza. VI. Bayona, Mauricio. VII. Sampedro, Natalia. VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IX. Serie. IDB-TN-2991

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



NOTA TÉCNICA

RIESGO DE DESASTRES Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO DE LA **CIUDAD DE PANAMÁ**



Autores

Amarilis Ulloa
Christian Ross de la Guardia
Eduardo García Alonso
Elsa Cacho Taeño
Esperanza González-Mahecha
María Alejandra Escovar
Mauricio Bayona
Natalia Sampetro Carral

RIESGO DE DESASTRES Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO DE LA CIUDAD DE PANAMÁ

Autores

Amarilis Ulloa
Christian Ross de la Guardia
Eduardo García Alonso
Elsa Cacho Taeño
Esperanza González-Mahecha
María Alejandra Escovar
Mauricio Bayona
Natalia Sampedro Carral



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Riesgo de desastre y cambio climático en el sistema de transporte urbano de ciudad de Panamá / Amarilis Ulloa, Christian Ross de la Guardia, Eduardo García Alonso, Elsa Cacho Taeño, Esperanza González-Mahecha, Mauricio Bayona, Natalia Sampedro Carral.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2991)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Natural disasters-Government policy-Panama. 2. Environmental risk assessment-Government policy-Panama. 3. Urban transportation policy-Panama. 4. Climatic changes-Panama. I. Ulloa, Amarilis. II. Ross de la Guardia, Christian. III. García, Eduardo. IV. Cacho Taeño, Elsa. V. González-Mahecha, Esperanza. VI. Bayona, Mauricio. VII. Sampedro, Natalia. VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IX. Serie. IDB-TN-2991

JEL Codes: Q54, R41, O18

Palabras clave: Agua y saneamiento, Gestión de riesgo de desastres, Sistema de transporte, Cambio Climático, Transporte Público.



TABLA DE CONTENIDOS

Lista de abreviaciones	09
Resumen Ejecutivo	10
Introducción	12

 1. Cambio climático, ciudades, y la evaluación del riesgo	16 -17
A El cambio climático en ciudades	19
B Riesgo climático en infraestructuras clave y sistemas de transporte urbano	20
C La evaluación del riesgo de desastres y cambio climático en ciudades	21

 2. Antecedentes y contextualización de los estudios	24 - 25
A La Ciudad de Panamá y su Sistema de Transporte Público	27
B Enfoque Técnico de la Metodología	31

 3. Evaluación de la amenaza	32 - 33
A Evaluación de la amenaza por inundación	34
Área de estudio y delimitación de cuencas vertientes	34
Caracterización espaciotemporal de lluvias extremas actuales	37
Caracterización espaciotemporal de lluvias extremas futuras	39

Box 1. Curvas IDF	42
Aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos	43
B Evaluación de la amenaza por ola de calor	46
Evaluación de riesgo por olas de calor: Próximos pasos	49

 4. Evaluación de la exposición	50 - 51
A Exposición física	52
Resultados de la exposición física por inundación	54
B Exposición Social	61

 5. Evaluación del Riesgo en el Sistema de Transporte Urbano	64 - 65
A Evaluación del riesgo por inundación	66
Impacto de las inundaciones en la situación actual	67
Impacto de las inundaciones para el escenario de cambio climático SSP2-4.5 a 2050	73

 6. Selección de Áreas Prioritarias de Intervención	78 - 79
---	---------

 7. Conclusiones	88 - 89
Referencias	92 - 93

LISTA DE ABREVIACIONES

ACP	Autoridad del Canal de Panamá
AMCP	Área Metropolitana de Ciudad de Panamá
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
C.C.	Centro Comercial
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina
CO2	Dióxido de carbono
EAD	<i>Estimated Annual Damage</i> ; Daños Anuales Totales Previstos
ETESA	Empresa de Transmisión Eléctrica
GCM	<i>Global Climate Model</i> ; Modelo Climático Global
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
HI	<i>Heat Index</i> ; Índice de Calor
ICES	Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles
ICM	<i>Integrated Catchment Modeling</i> ; Modelización Integrada de Cuenca
IDF	Intensidad- Duración-Frecuencia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ; Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MOP	Ministerio de Obras Públicas
NEX-GDDP	<i>NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections</i> ; Proyecciones de escala reducida de intercambio Terrestre global diario
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMU	Observatorio de Movilidad Urbana de América Latina
PAE	Pérdida Anual Esperada
PIB	Producto Interno Bruto
PIMUS	Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable
PMP	Pérdida Máxima Probable
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i> ; Trayectorias Socioeconómicas Compartidas
TMPSA	Transporte Masivo De Panamá, S.A.
UNDRR	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres

Equipo técnico consultor y colaboradores: Elsa Cacho Taeño, Eduardo García Alonso, Natalia Sampedro Carral del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria - IH Cantabria

Equipo técnico BID: Esperanza González-Mahecha (CSD/CCS), María Alejandra Escovar (CSD/RND), Mauricio Bayona (INE/TSP)

Equipo técnico MiBus: Amarilis Ulloa

Apoyo editorial: Christian Ross de la Guardia

Agradecimientos: Por su participación, comentarios constructivos y retroalimentación, agradecemos a Ernesto Monter, Camilo Saldías, Wilhelm Dalaison, Ana Milena Avendaño, y Mariana Alfonso

Este documento recoge los hallazgos de investigación financiada por la Cooperación Técnica RG-T3657

Citación sugerida: Ulloa, A., Ross, C., García, E., Cacho, E., González-Mahecha, E., Escovar, M., Bayona, M., Sampedro, N. 2024. *Riesgo de Desastres y Cambio Climático en el Sistema de Transporte Urbano de Ciudad de Panamá*. Banco Interamericano de Desarrollo

RESUMEN EJECUTIVO

Esta nota técnica examina los resultados de una evaluación cuantitativa del riesgo de desastres y por inundaciones y calor extremo para el sistema de transporte público urbano en el Área Metropolitana de Ciudad de Panamá (AMCP). El objetivo de este esfuerzo es promover la implementación de intervenciones urbanas, consideradas como medidas de adaptación, que puedan reducir la vulnerabilidad de los componentes del sistema de transporte público y aumentar su resiliencia al clima.

La identificación del riesgo se enfocó en analizar las amenazas de inundación y olas de calor en situación de clima actual y para un horizonte futuro con varias proyecciones de cambio climático. Para el caso de las inundaciones, se hizo una evaluación de la amenaza por desbordamiento de cauces que cruzan la ciudad y por lluvias intensas. Para el caso de la amenaza por olas de calor, se utilizó el indicador de Índice de calor o Heat Index, que combina variables de temperatura del aire y humedad relativa, para determinar la peligrosidad de calor extremo para la salud humana.

El análisis de la exposición física se realizó en base a un total de 1,470 paradas (estaciones) identificadas a octubre 2022 y 6 centros de operación y ejecución (patios) que conforman el sistema de buses de transporte público urbano de MiBus en el AMCP. Así, se obtuvo el área expuesta, medida como el área total propensa a las amenazas. Mientras que la exposición social usó de referencia el número de usuarios diario medio de cada parada analizada del sistema MiBus, estimado de 132,000¹. Es importante destacar que la identificación de elementos expuestos se realizó definiendo un área de potencial inundación a partir de un modelo digital del terreno, que cubre toda la infraestructura de transporte, incluidas las vías. Es así como como la identificación de las paradas con potencial de inundación permite determinar los tramos de vía afectados.

En la evaluación del riesgo de referencia o situación actual, los eventos frecuentes de inundación (períodos de retorno de 5 años) afectan 8 paradas (0.5% del total), 2 patios (33.3% del total), y 1,116 usuarios (0.84% del total). Los eventos de inundación de baja probabilidad (períodos de retorno de 100 años) afectan 34 paradas (2.3% del total), 2 patios (33.3% del total), y 4,082 usuarios (3.08% del total).

En cambio, en la evaluación del riesgo climático futuro, utilizando el escenario de cambio climático SSP2-4.5 a 2050, los eventos frecuentes de inundación (períodos de retorno de 5 años) afectarían 29 paradas (2% del total), 1 patio (16.6% del total), y 1,982 usuarios (1.5% del total). Los eventos de inundación de baja probabilidad (períodos de retorno de 100 años) afectarían 91 paradas (6.2% del total), 3 patios (50% del total), y 7,811 usuarios (5.9% del total).

De acuerdo con estas evaluaciones y otros criterios relacionados a proyectos futuros, se seleccionaron áreas prioritarias de intervención. Específicamente se consideraron paradas de buses del sistema MiBus, asignándoles también niveles de prioridad en base a la frecuencia de eventos de inundación.

Se evidenciaron retos para la evaluación de riesgos de desastres y climáticos en sistemas de transporte público. Estos están relacionados a la escasez de datos instrumentales, a la dificultad para identificar factores de vulnerabilidad, y a los conflictos en la coordinación interinstitucional para la implementación de medidas de reducción de riesgo. Entre las recomendaciones para próximos estudios destaca la consideración de escenarios de crecimiento urbano y de la expansión del sistema de transporte público. Además, se sugiere complementar las medidas estructurales de reducción de riesgo con intervenciones en el marco social, y actualizaciones en el marco institucional y normativo.

Con pocos estudios de riesgo de desastres y cambio climático en sistemas de transporte público, este esfuerzo contribuye a la necesidad de profundizar en las maneras que se pueden aumentar la resiliencia de los sistemas de transporte público urbano, y reducir las incertidumbres climáticas en las inversiones de adaptación a los efectos del cambio climático en ciudades.

¹ Los reportes de MiBus señalan que la media diaria de usuarios es de 340.000 usuarios/día en todo el sistema. Para efectos de este tipo de estudios se requiere contar con información georreferenciada; es decir, contar con una base de datos del número de usuarios por parada y ruta. Este estudio determinó el número de usuarios medios diarios por estaciones y rutas de buses a partir de información suministrada por MiBus para el periodo comprendido entre enero de 2021 y octubre de 2022. Luego de la validación de los datos disponibles y asegurando su georreferenciación se obtuvo una media diaria de 132.000 usuarios/día. Sin embargo, esta diferencia no altera la identificación de las paradas y rutas críticas del sistema de transporte por tratarse de una metodología robusta para el cálculo del riesgo.



INTRODUCCIÓN

La movilidad está relacionada a todos los aspectos de la vida urbana; desde el comercio y la industria, hasta la educación y el tiempo de ocio. En las grandes ciudades de América Latina, la movilidad urbana se da principalmente a través de los sistemas de transporte público. Así lo indica el Observatorio de Movilidad Urbana de América Latina (OMU) del Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) en su segundo reporte, publicado en 2016, con datos de 29 ciudades de la región. Se contabilizaron 293 millones de viajes diarios, de los cuales 121 millones fueron en transporte público, que equivalen al 40% del total de los viajes diarios en estas ciudades, seguido por el transporte individual, y, por último, a pie (Vasconcellos & Mendonça, 2016). El área metropolitana de Ciudad de Panamá no escapa de esta realidad, según el “Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable – PIMUS” elaborado con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en el AMCP donde habitan cerca de dos millones de personas, se realizan diariamente 2.258.827 viajes: un 45,41% se realizan en auto (9,31% taxi y 36,10% particular), un 38,05% en transporte público y un 16,55% en otros modos (destacan la caminata [8,11%] y la bicicleta [0,16%])².

El sector de transporte público está estrechamente ligado al desarrollo urbano sostenible. Su fortalecimiento y mejoramiento está entre las medidas más importantes para aumentar la calidad de vida en los centros de las ciudades. El desarrollo urbano orientado hacia el transporte colectivo es considerado una estrategia que complementa y fortalece el sistema de transporte, fomenta el uso de

distintos modos de transporte, promueve el uso eficiente del suelo urbano, aumenta el valor de las propiedades y los ingresos tributarios relacionados, y contribuye a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero y de otros materiales contaminantes (Farías, 2012; Rodríguez et al., 2018).

A pesar de su importancia para la movilidad urbana, la infraestructura de transporte público ha sido señalada por varios estudios como uno de los componentes más vulnerables a los efectos de eventos climáticos extremos en ciudades (Eichhorst et al., 2011; Hagen et al., 2022; Sánchez Rodríguez, 2013). Amenazas como inundaciones, deslizamientos de tierra, y olas de calor, que actualmente azotan a las ciudades de la región, se esperan que incrementen en frecuencia e intensidad con el cambio climático. En 2017, por ejemplo, las inundaciones generaron pérdidas económicas de US\$ 3.100 millones en Perú, y 329 muertes en Colombia. Sumando el cambio climático, los daños podrían costar a la región US\$ 100.000 millones por año para el 2050 (Barandiarán et al., 2019). Los impactos a la red de transporte público urbano suelen ocurrir en detrimento de la infraestructura de transporte, del funcionamiento de la flota vehicular y sus operaciones, y, en consecuencia, de la movilidad en las urbes. Considerando el efecto “cascada” que se produce por la interconexión con otros sectores económicos y sociales, más allá del riesgo físico, los impactos de eventos climáticos actuales y futuros en ciudades generan dificultades para garantizar la producción, distribución y acceso a servicios urbanos básicos.

El sector de transporte público está estrechamente ligado al desarrollo urbano sostenible. Su fortalecimiento y mejoramiento está entre las medidas más importantes para aumentar la calidad de vida en los centros de las ciudades.

² Alcaldía de Panamá, 2016.

Hay que profundizar en conocer las causas del riesgo de desastres e impactos del cambio climático en las dinámicas del desarrollo urbano, y tratar la gestión y prevención de riesgos como un proceso social, vinculado al desarrollo local en todas sus dimensiones. La información generada sobre los riesgos asociados a los eventos hidrometeorológicos y climáticos debe estar al alcance de actores locales. Así, entonces puede contribuir al desarrollo de estrategias, políticas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad y fomentar la adaptación al cambio climático.

Para la resiliencia de los sistemas de transporte público urbano, por ejemplo, algunas sugerencias de adaptación basadas en estudios de vulnerabilidad incluyen: combinar infraestructuras verde-azules —como arrecifes de coral y manglares— con infraestructuras grises —como carreteras— para reducir la vulnerabilidad a inundaciones y erosión costera; sistemas de drenaje optimizados para lluvias más intensas, incluyendo pavimentos permeables; mantenimiento periódico de infraestructuras; diseños de infraestructura

con espacios verdes (siembra de árboles) para reducir efectos de temperaturas altas y exposición a inundaciones; estándares de diseño estructural más conservadores; integrar información sobre ecosistemas en los procesos de toma de decisiones para mitigar riesgos y conflictos entre el entorno natural y el construido; capacitaciones en planes de emergencia; sistemas de alerta temprana; y hasta la restricción de desarrollos en localidades de alto riesgo (Baskin, 2023; Eichhorst et al., 2011; UNDRR, 2022a).

Esta nota técnica examina los resultados de una evaluación cuantitativa del riesgo climático y de desastres por inundaciones y calor extremo para el sistema de transporte público urbano en el área metropolitana de la Ciudad de Panamá. El objetivo de este esfuerzo es promover la implementación de intervenciones urbanas, consideradas como medidas de adaptación, que puedan reducir la vulnerabilidad de los componentes del sistema de transporte público y aumentar su resiliencia al clima. Para lograr este objetivo general, el estudio se enfoca en los siguientes objetivos específicos:



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles



Evaluación del riesgo de referencia:

se evaluará en la situación actual el riesgo de inundaciones y la amenaza por calor extremo en el área de cobertura del sistema de transporte público urbano de la Ciudad de Panamá.



Evaluación del riesgo climático futuro:

se realizará una evaluación de la amenaza en escenario climático futuro para las mismas amenazas y área de cobertura, y se comparará la evaluación de riesgo por inundación con la situación actual, validando las áreas a priorizar para aplicar medidas de adaptación al cambio climático.



Selección de áreas prioritarias de intervención:

determinación de zonas donde se requieren proyectos de adaptación a las inundaciones, actual o futuro (con niveles de prioridad asignados), como condición necesaria para garantizar la integridad y durabilidad de los nuevos proyectos del sistema de transporte público urbano.

El Marco de Infraestructura sostenible del BID señala que los proyectos de infraestructura sostenible están (o deberían estar) situados y diseñados para asegurar su resiliencia ante los riesgos climáticos y de desastres. Para atender este tema, el BID puso a disposición la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID, que facilita la identificación y evaluación de riesgo de desastres y cambio climático y las oportunidades de resiliencia en todos los

proyectos relevantes durante sus fases de identificación, preparación e implementación (Barandiarán et al., 2019). Así, tomando estas referencias, esta Nota Técnica, a través de un proceso de identificación, clasificación y evaluación, busca aprovechar los conocimientos generados para incorporar la resiliencia en las oportunidades de inversión en adaptación de los proyectos de desarrollo del Área Metropolitana de Ciudad de Panamá.

1.

CAMBIO CLIMÁTICO, CIUDADES, Y LA EVALUACIÓN DEL RIESGO





Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

El sistema climático del planeta Tierra ha evolucionado por millones de años. Los archivos naturales documentan un amplio historial de evidencia de cambios observados en el clima que permiten proyectar cambios para los próximos siglos. Estas reconstrucciones del clima pasado también muestran una fuerte correlación entre la temperatura global superficial y las concentraciones atmosféricas de CO₂.

Desde el siglo XIX se identificaron las causas naturales principales de cambio climático, y se planteó la hipótesis de un potencial cambio climático antropogénico debido a las emisiones de CO₂ con el uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón, y gas natural). Las causas naturales del cambio climático —incluyendo cambios en la radiación solar entrante, actividad volcánica, ciclos orbitales y los cambios en los ciclos biogeoquímicos globales— han sido estudiados sistemáticamente desde el siglo XX. Además, en 1970 se identificaron otras causas antropogénicas principales del cambio climático, como el uso de aerosoles atmosféricos, el cambio en el uso de suelo, y otros gases de efecto de invernadero aparte del CO₂. Desde esta época se realizan evaluaciones científicas sistemáticas del clima, en las que la influencia de las actividades humanas en el calentamiento global ha pasado de ser teoría a ser un hecho probado.

Las actividades humanas inequívocamente han causado el calentamiento global, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a una temperatura global superficial en 2011-2020 de 1.1°C mayor que la existente en 1850-1900 (IPCC, 2023). Cambios en un mayor número de componentes del sistema climático, incluyendo el calentamiento de los océanos, el aumento del nivel del mar, y el derretimiento de glaciares, pueden atribuirse ahora a la influencia humana (P.A. Arias et al., 2021). Así, en todas las regiones del mundo también se observa el incremento en frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos y eventos climáticos extremos —como olas de calor terrestres y marinas, fuertes precipitaciones, sequías, y ciclones tropicales— con un alto grado de confianza en que el cambio climático provocado por el humano es el principal causante de estos cambios (IPCC, 2023).



El cambio climático ha causado daños sustanciales, y pérdidas cada vez más irreversibles, en los ecosistemas terrestres, de agua dulce, marinos costeros y de alta mar (IPCC, 2022b, 2023). El deterioro generalizado de la estructura y funciones de los ecosistemas, de su resiliencia y su capacidad de adaptación natural, así como cambios en el calendario estacional han ocurrido debido al cambio climático, con consecuencias socioeconómicas adversas. La pérdida de cientos de especies a nivel local ha tomado lugar debido a incrementos en la magnitud de calores extremos, y a eventos de mortalidad masiva en ecosistemas terrestres y en los océanos. Algunos impactos se aproximan a lo irreversible, como los cambios en la hidrología resultante de la retirada de los glaciares, o los cambios en los ecosistemas árticos por el deshielo. Otros impactos del cambio climático en los ecosistemas, de evolución más lenta,

son la acidificación de los océanos, la subida del nivel del mar, y disminuciones regionales de precipitación. El cambio climático ha contribuido a la desertificación y ha exacerbado la degradación del suelo, especialmente en zonas costeras bajas, deltas fluviales, zonas áridas y en zonas de permafrost. Casi el 50% de los humedales costeros se han perdido en los últimos 100 años, como resultado de los efectos combinados de la presión humana localizada, la subida del nivel del mar, el calentamiento y los fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2023). Lo anterior conlleva la exposición de millones de personas a una grave inseguridad alimentaria y a una menor seguridad hídrica. Las mayores repercusiones se han observado en muchos lugares y/o comunidades de África, Asia, América Central y del Sur, los pequeños Estados insulares y el Ártico (IPCC, 2022b, 2023).

A El cambio climático en ciudades



A nivel mundial, la población urbana creció en más de 397 millones de personas entre 2015 y 2020, con más del 90% de este crecimiento en las regiones menos desarrolladas. Para el 2050 se prevé que otros 2,500 millones de personas vivirán en zonas urbanas (Pörtner et al., 2022). Según las contribuciones sobre impactos, adaptación y vulnerabilidad del Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los efectos observados del cambio climático en las ciudades, las zonas periurbanas y los asentamientos han ido más allá de los efectos directos e inducidos por el clima y se han convertido en efectos

combinados, en cascada y sistémicos (IPCC, 2022a). La exposición a los impactos del clima, como olas de calor, precipitaciones extremas y tormentas, junto con la rápida urbanización y la falta de planificación sensible al clima, junto con las amenazas de las islas de calor urbano, aumenta la vulnerabilidad de las poblaciones urbanas marginadas y de las infraestructuras clave ante el cambio climático. Por ejemplo, por un lado, las precipitaciones más frecuentes sobrepasan la capacidad actual de los sistemas hídricos urbanos, y por otro, las estructuras existentes no fueron diseñadas para los eventos extremos de precipitación, y en muchos casos ya cumplieron su vida útil, aumentando la



inseguridad hídrica urbana y periurbana. Las proyecciones apuntan a que 350 millones de personas adicionales en zonas urbanas estarán expuestas a la escasez de agua por sequías graves con un calentamiento de 1,5°C, y 410,7 millones con un calentamiento de 2°C (Pörtner et al., 2022). Por otro lado, se proyecta un alto potencial de riesgo climático con la expansión de ciudades hacia zonas costeras y montañosas propensas a inundaciones o deslizamientos de tierra que interrumpen las redes de transporte.

Las personas, los medios de subsistencia, los ecosistemas, los edificios y las infraestructuras de muchas ciudades y asentamientos costeros ya están sufriendo graves efectos combinados, entre otros, por la subida del nivel del mar y la variabilidad climática (IPCC, 2022a). Se han detectado impactos tempranos de la aceleración del aumento del nivel del mar que se manifiestan como inundaciones con mareas altas, salinización de la capa freática, transiciones

agrícolas y de ecosistemas, aumento de la erosión y daños por inundaciones costeras. Actualmente, las ciudades costeras que ya dependen de extensas obras de protección se enfrentan a un aumento significativo de los costos actuales de mantenimiento, sobre todo si el nivel del mar sube hasta el punto de que las medidas actuales no sean sostenibles ni financiera ni técnicamente; serán necesarios cambios sistémicos, como la reubicación de millones de personas. Los riesgos climáticos, incluidos los relacionados a la subida del nivel del mar, interactúan de forma compleja con factores no climáticos del cambio costero, como el hundimiento del terreno, el desarrollo de infraestructuras en llanuras aluviales costeras, el aumento del valor de los activos y el desarrollo hacia el litoral que afecta negativamente a los ecosistemas costeros, para configurar el riesgo futuro en los asentamientos costeros (Pörtner et al., 2022).

B Riesgo climático en infraestructuras clave y sistemas de transporte urbano



Los sistemas de infraestructuras prestan servicios críticos a las personas, la sociedad y la economía, tanto en zonas urbanas como rurales. Su disponibilidad y fiabilidad influyen directa o indirectamente en la consecución de todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Pörtner et al., 2022). La variabilidad climática actual ya está causando impactos en los sistemas de infraestructuras de todo el mundo (IPCC, 2022a). Para las infraestructuras físicas (energía, transporte, comunicaciones [incluidas las digitales], edificios, agua y saneamiento, y

gestión de residuos sólidos), con un valor actual de 143 mil billones de USD, The Economist Intelligence Unit (2015, citado por IPCC, 2022a) estima unas pérdidas de valor actual de 4,2 mil billones de USD para el año 2100 en un escenario de 2°C. Esta estimación se eleva a 13,8 mil billones de USD en un escenario de 6°C. Los fenómenos extremos están asociados a la interrupción o pérdida completa de los servicios de estas infraestructuras, mientras que los cambios graduales en las condiciones medias están alterando el rendimiento de las



infraestructuras físicas. Las infraestructuras físicas suelen ser costosas de reparar y también tienen importantes repercusiones en la salud y el bienestar de las personas. Debido a la conectividad de los sistemas de infraestructuras, los impactos climáticos, como las fuertes tormentas que afectan a las redes de energía y transporte, pueden propagarse más allá de la zona de peligro y causar impactos mayores e interrupciones regionales (Pörtner et al., 2022).

En los últimos años se ha avanzado en la investigación de la cuantificación de costos de los impactos de riesgos climáticos en la infraestructura de transporte. A escala mundial, Koks et al. (2019, citado por IPCC, 2022a) calcularon que aproximadamente el 7,5 % de los activos de carreteras y activos ferroviarios están expuestos a eventos de inundación de 1 en 100 años, y los daños anuales totales previstos a nivel mundial (EAD, por sus siglas en inglés) son de 3 mil millones a 22 mil millones de USD debido a los daños directos por vientos huracanados,

inundaciones superficiales y fluviales, e inundaciones costeras. A pesar de que el EAD representa una fracción relativamente pequeña del producto interno bruto global (PIB; ~ 0.02%), en algunos países el EAD equivale al 0.5-1% del PIB, que es el mismo orden de magnitud que los presupuestos nacionales típicos de infraestructuras de transporte (IPCC, 2022a). Sobre el impacto futuro del cambio climático, algunos estudios calculan los cambios en la EAD por inundaciones basados en el uso del suelo, mostrando aumentos del 170-1370%, dependiendo de los niveles globales de emisiones de gases de efecto invernadero (Alfieri et al., 2017; Winsemius et al., 2015; citado por IPCC, 2022a). Además, Schweikert et al. (2014, citado por IPCC, 2022a) señalan que los riesgos climáticos para las infraestructuras de transporte podrían costar hasta un 5 % de los presupuestos anuales de infraestructuras viarias en 2100, con un impacto desproporcionado en algunos países de renta baja y media-baja.

C La evaluación del riesgo de desastres y cambio climático en ciudades



El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (Marco de Sendai) fue el primer gran acuerdo de la agenda de desarrollo post-2015 y proporciona a los Estados miembros acciones concretas para proteger los logros del desarrollo frente al riesgo de desastres (UNDRR, 2024). Éste es implementado por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR por sus siglas en inglés), y para ello se han definido cuatro

áreas prioritarias. La primera de éstas es la comprensión del riesgo de desastres en todas sus dimensiones de vulnerabilidad, capacidad, exposición de las personas y los bienes, características de las amenazas, y el medio ambiente. Este conocimiento puede utilizarse para la evaluación del riesgo, la prevención, la mitigación, la preparación y la respuesta (UNDRR, 2022b).



Siguiendo un marco conceptual ampliamente aceptado (Abhas et al., 2014, citado en Garcia et al., 2019), el riesgo resulta de la coincidencia, en el tiempo y en el espacio, de una amenaza y un ente (ser vivo o cualquier elemento físico o intangible del territorio) susceptible de experimentar una pérdida de valor, funcionalidad o bienestar, como consecuencia de esa amenaza. La exposición es la cualidad binaria que refleja esta coincidencia, mientras que la vulnerabilidad recoge todos los factores que explican la conversión de la amenaza en daños. La vulnerabilidad es, en definitiva, la caracterización de ciertas propiedades de los elementos expuestos, desde el punto de vista de su potencial de ser afectados o destruidos,

y puede tener varias dimensiones: humana (daño físico o psicológico, muerte), económica (pérdida de valor de activos), o de otro tipo (por ejemplo, daños ambientales o de patrimonio).

Este esquema se resume en la pseudoecuación $Riesgo = Amenaza \times Exposición \times Vulnerabilidad$ (Figura 1), que indica que el impacto total que puede producir un evento tiene una probabilidad asociada que resulta de combinar la probabilidad de dicho evento, la probabilidad de que afecte espacialmente zonas ocupadas y, finalmente, la de que los activos y personas expuestos sufran daños.

Figura 1

Esquema amenaza-exposición-vulnerabilidad-riesgo (Garcia et al., 2019)



Fuente: Garcia et al., 2019



La adaptación al cambio climático ha cobrado mayor importancia en la evaluación del riesgo de desastres a medida que los gobiernos e instituciones han tomado conciencia sobre la necesidad del mundo de adaptarse a los cambios en el clima. Tanto la IPCC como la UNDRR han reconocido esta intersección del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático. Se introduce así al riesgo climático como los efectos que la alteración del clima tiene en las condiciones ya existentes, en particular con relación al riesgo de desastres. Esto significa incorporar un componente de cambio y variabilidad (e incertidumbre) al tratamiento hasta ahora estático de las amenazas relacionadas con fenómenos hidrometeorológicos (en el futuro) en el riesgo de desastres. Se podría considerar al cambio climático como un factor de modificación (y de posible exacerbación) del riesgo de desastres (Barandiarán et al., 2019).

El estudio de riesgos en ciudades debe incluir tanto el espacio urbano como los territorios en su zona de influencia, en la medida en que estos últimos determinan las amenazas o aportan recursos no sustituibles. Por ejemplo, el caso de un embalse que almacena agua para consumo humano, una central energética, o un centro logístico en las afueras de una aglomeración urbana. La consideración sobre el ámbito espacial de trabajo en función de cada ciudad y de los riesgos seleccionados para estudio repercute en la toma de datos, en la determinación de la amenaza, y en la viabilidad de las propuestas de reducción de riesgo que se propongan. Aun así, es dentro de las ciudades, y no en sus zonas circundantes, donde se producen la mayor parte de los daños económicos y humanos (Garcia et al., 2019). Además, las ciudades suelen ser unidades administrativas, jurídicas y culturales, permitiendo identificar al destinatario de los estudios (municipalidad) y el marco legal en que se insertan las medidas de reducción de riesgos (plan urbano, ordenanzas locales, etc.).

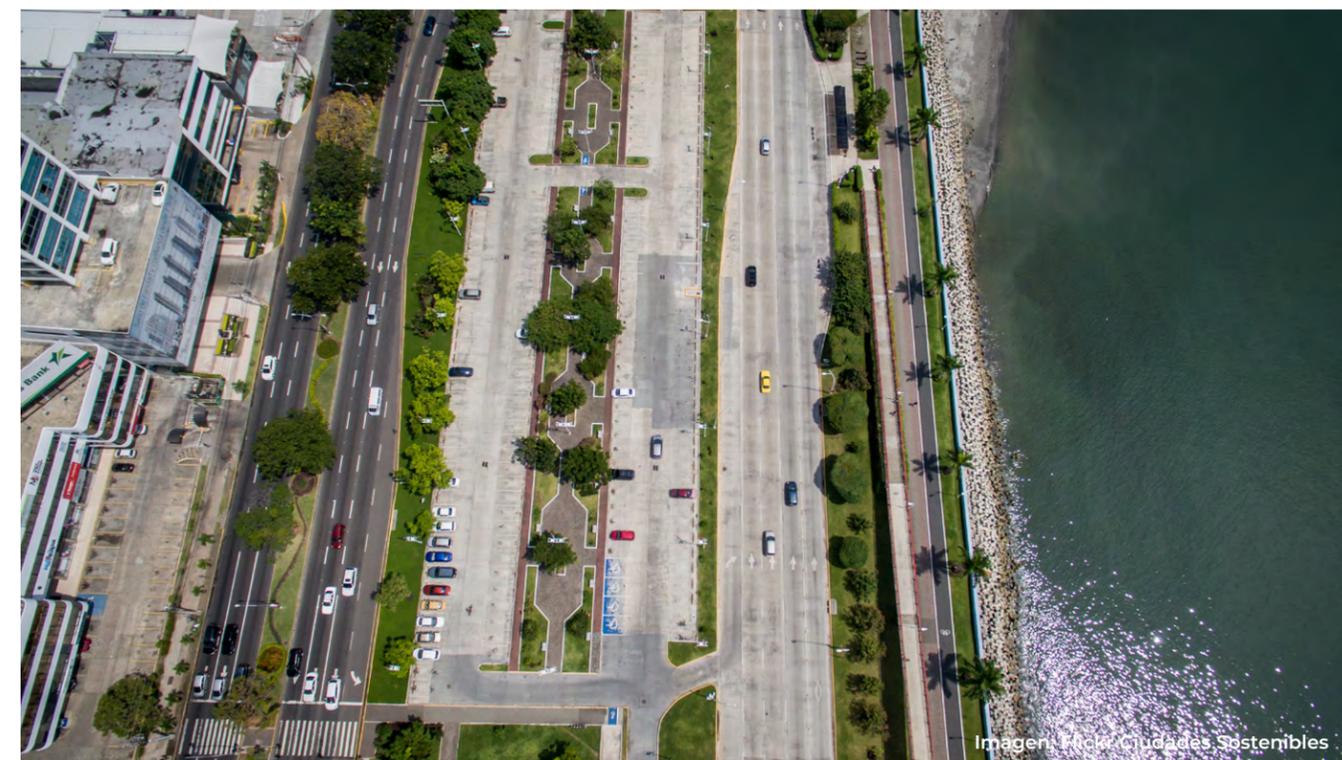


Imagen: Flickr/Ciudades Sostenibles

2.

ANTECEDENTES Y CONTEXTUALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS





Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

Además de las grandes metrópolis de América Latina, existen aproximadamente 140 ciudades emergentes, con menos de dos millones de habitantes cuyas economías y poblaciones están en fase de crecimiento acelerado. Para crecer de manera sostenible, estas ciudades deben adoptar un enfoque planificado e integral que les permita utilizar eficientemente los recursos naturales y adaptarse a las consecuencias del cambio climático. Ante este escenario en 2010 surge la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) como una propuesta institucional del BID, con el objetivo inmediato de contribuir a la sostenibilidad ambiental, urbana, fiscal y de gobernabilidad de las ciudades de la región Latinoamericana, con un modelo que fomente la participación ciudadana (BID, 2016).

Como parte de las evaluaciones realizadas para identificar los retos de sostenibilidad más apremiantes en las ciudades, en 2016 el Programa ICES desarrolló un estudio de riesgos de desastres y vulnerabilidad ante el cambio climático para Ciudad de Panamá. Dentro del estudio se identifican los procesos y actores involucrados en la dinámica de generación de riesgos en la ciudad. Entre otras, se señala la ausencia de estudios especializados, la ausencia de un plan de desarrollo urbano metropolitano, y las deficiencias en diseño de infraestructura vial provocando la falta de drenaje adecuado. Entre las propuestas de acción para la reducción de riesgos están la evaluación de las cuencas medias y altas de los ríos que atraviesan la

ciudad, la elaboración de un sistema de alerta temprana, y la difusión de información a la población potencialmente afectada.

Además de estas consideraciones, el estudio actual se apoya en la Estrategia Panamá Resiliente (Alcaldía de Panamá, 2018), implementado por Alcaldía de Panamá como parte del Programa 100 Ciudades Resilientes de la Fundación Rockefeller. De igual manera, el estudio toma en cuenta medidas del Programa Patrimonio Vivo del BID, que impulsa la conservación y puesta en valor del patrimonio urbano como catalizador del desarrollo urbano sostenible y equitativo (Navarrete et al., 2020).



A La Ciudad de Panamá y su Sistema de Transporte Público



La historia de la Ciudad de Panamá está ligada a migraciones que han llevado a una composición etnográfica y económica de población muy diversa. La mano de obra para la construcción de un ferrocarril interoceánico entre 1850 y 1855, y el Canal interoceánico entre 1906 y 1914, crearon oportunidades de migración a la Ciudad de Panamá. Luego de la creación de la Zona del Canal en 1904, la zona urbana creció hacia el este, dirección donde la ciudad se desarrolla hasta hoy. Tras la eliminación de la Zona del Canal en 1979, la Ciudad de Panamá inició un proceso de desarrollo hacia el norte, a lo largo de la carretera Transísmica, y otro de conurbación hacia el oeste, transformando una parte sustancial de las ciudades de Arraiján

y La Chorrera en “áreas dormitorio” de las cuales muchos de sus habitantes se movilizan para trabajar en los distritos de Panamá y San Miguelito (Castro, 2016, citado por Alcaldía de Panamá, 2018).

El AMCP está localizada a orillas del Golfo de Panamá, en el Océano Pacífico, y al este de la desembocadura del Canal de Panamá (Figura 2). Su desarrollo ha producido un crecimiento de forma radial condicionado por las circunstancias de su entorno. El AMCP está conformada por los Municipios de Panamá y San Miguelito. Su tamaño es de 2,095.5 km² donde se concentran 1.4 millones de habitantes (34% de la población) y el 40% de los empleos del país (INEC, 2023).

Figura 2

Mapa de localización de la Ciudad de Panamá



Fuente: Alcaldía de Panamá, 2018



Hasta el 2010 los viajes de transporte público en la AMP eran atendidos por un sistema atomizado y de competencia en el mercado con autobuses denominados "diablos rojos". En el 2010 comenzó a operar el sistema Metro Bus en la AMCP, que hoy en día circula en la mayoría del área de los distritos de Panamá y San Miguelito. A medida que se fue expandiendo, Metro Bus llegó a tener 700 mil abordajes en un día hábil, y luego la demanda declinó hasta tener alrededor de 460 mil abordajes al día (Metro Panamá S.A., 2017, citado por Scorcia, 2018). Esto ocurrió debido a la ausencia de un cambio institucional para gestionar y monitorear el sistema, la falta de infraestructura preferencial para los buses, las obras en la ciudad durante la construcción del metro, la falta de flota, la imposibilidad de los buses de operar en calles estrechas, y el retorno de algunos diablos rojos y buses piratas (Scorcia, 2018).

El sistema de MiBus está a cargo de la empresa pública Transporte Masivo de Panamá, S.A. (TMP SA), inicialmente administrado por el consorcio colombo-panameño Transporte Masivo de Panamá hasta el 2016, cuando el Gobierno Nacional compró y asumió las operaciones de la empresa, quedando las acciones a cargo de Metro Panamá S.A. (empresa pública), y contrató una firma gestora estadounidense para estabilizar la operación. En el año 2019, MiBus pasó a ser gestionada totalmente por personal panameño.

Por otro lado, en 2014 empezó a operar el sistema de metro de Panamá, con secciones subterráneas y tramos elevados. En contraste con el sistema MiBus, la demanda de pasajeros del Metro ha venido creciendo significativamente, validando el éxito del sistema y conllevando a que la red del Metro continúe su expansión. Hoy en día, el transporte público de la ciudad está

conformado por distintos modos, incluyendo el sistema tradicional (diablos rojos), el Metro, Metro Bus, los minibuses de transporte interno, y el transporte informal en buses y minibuses.

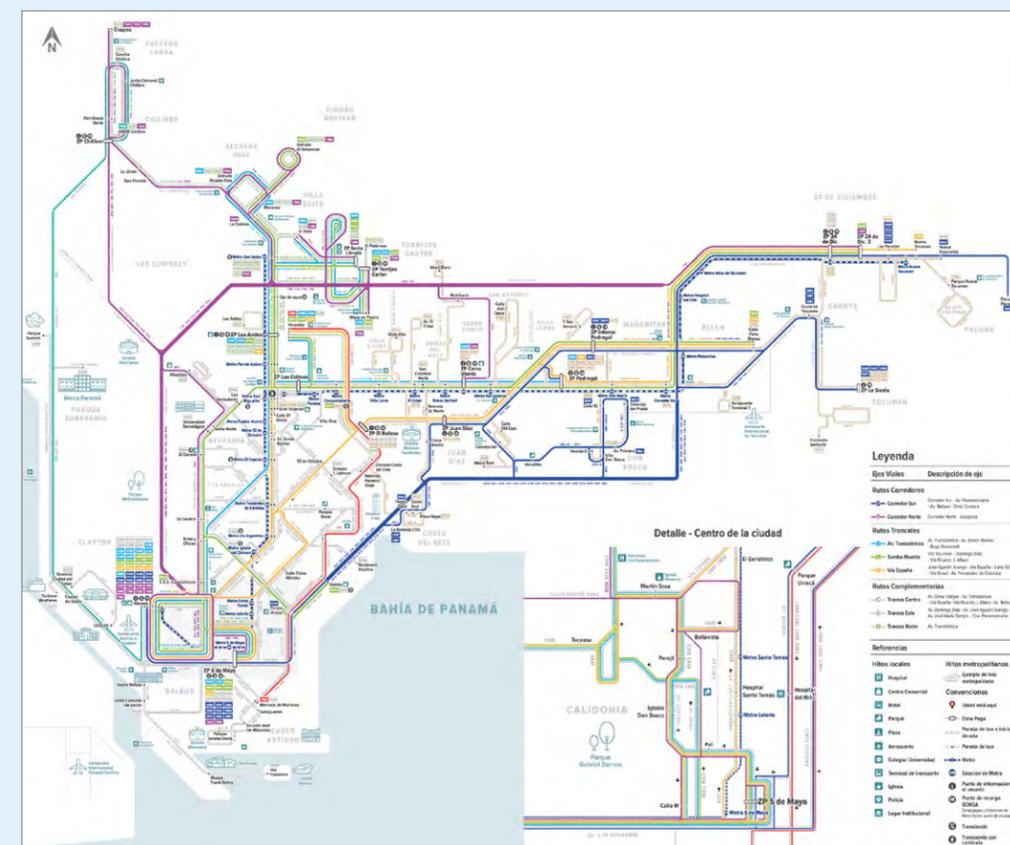
El despliegue de líneas de transporte urbano en superficie a cargo de MiBus es un correlato del crecimiento urbano y de la evolución espacial de la población. El sistema de transporte urbano MiBus cuenta a octubre de 2022 con 1,470 paradas, 142 rutas, 6 centros de operación y ejecución (patios) y 1,436 autobuses. En la Figura 3 puede apreciarse la red de transporte de MiBus de forma esquemática, conformada por las 142 rutas mostradas en diferentes colores. Las rutas se diferencian en rutas corredores (Sur y Norte), troncales (Avda. Transístmica, Tumba Muerto y Vía España) y complementarias (Tramos Este, Centro y Norte).

El número de usuarios diario medio estimado asciende a algo más de 132,000³. En la Figura 4 se muestra el número medio de usuarios diarios por parada en el área de estudio. Las rutas que cubren el centro, haciendo los recorridos más largos de suroeste a noreste, y las que suponen nodos en las vías del norte de la ciudad, son las que más usuarios por parada tienen.

En el norte, en la carretera Boyd Roosevelt (Transístmica), frente al Residencial Montserrat, la parada La Cabima es una de las más concurridas. La parada del C.C. El Lago, también en la carretera Transístmica, cercana a Las Cumbrecitas, está también dentro del grupo de paradas con más usuarios; también la parada que se encuentra en la entrada oeste de la Barriada Santa Librada, Policlínica Generoso Guardia. En El Pueblito, las paradas Ojo de Agua son puntos de concentración de usuarios, al igual que algunas de las paradas existentes en la zona de Los Andes.



Figura 3 Esquema de la red de transporte público MiBus

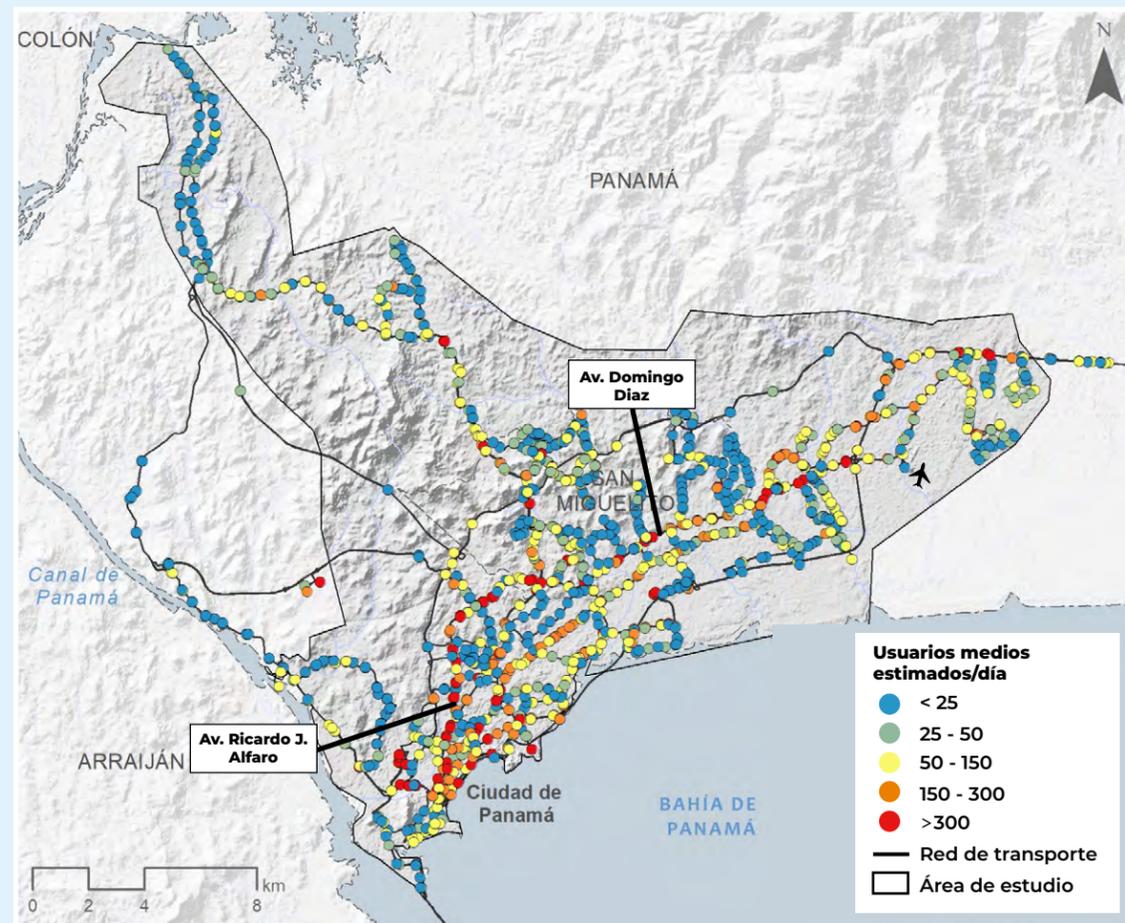


Fuente: página web MiBus (<https://www.mibus.com.pa/mapa-de-rutas/#spider-general>), 2023

³ Ver Nota 1



Figura 4 Usuarios medios estimados/día por parada



Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por MiBus, 2023.

La vía Ricardo J. Alfaro, que se convierte más adelante en la Avenida Domingo Díaz, recorre la ciudad de oeste a este llegando al Aeropuerto Internacional de Tocumen; es una importante vía de comunicación por lo que existen muchas paradas a lo largo de ella que

superan los 300 usuarios medios/día. Otra zona con muchas paradas con número elevado de usuarios es la zona de Albrook Mall, Ancón, y el centro de Panamá (La Exposición o Calidonia) (Ver Figura 4).



B Enfoque Técnico de la Metodología



Una evaluación probabilística de riesgo busca estimar la distribución de pérdidas (económicas y humanas) que se puede esperar que ocurran con una cierta recurrencia temporal en un conjunto determinado de activos o población que está expuesto a una o más amenazas naturales. El procedimiento consiste básicamente en crear un conjunto de todos los posibles eventos que podrían ocurrir en un área de estudio, en este caso eventos de inundación y olas de calor, que afectan al conjunto de activos expuestos para evaluar las pérdidas debidas a cada evento, y luego agregar estas pérdidas (utilizando la tasa de ocurrencia de cada evento como factor de ponderación) para obtener la distribución completa de las pérdidas esperadas

con su correspondiente tasa de excedencia. Las medidas de riesgo más comunes que se pueden obtener de este menú son la pérdida anual esperada (PAE) y la pérdida máxima probable (PMP). Un estudio de esta naturaleza consta de cuatro módulos: módulo de amenaza, módulo de exposición, módulo de vulnerabilidad y módulo de riesgo. Los siguientes apartados describen con mayor detalle los diferentes aspectos de la metodología propuesta. Cabe anotar que el alcance de este estudio se limita a la estimación de pérdidas en el sistema de transporte público de Panamá en términos de potenciales usuarios, paradas y patios afectados por eventos de inundación.



3.

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA





A Evaluación de la amenaza por inundación

La inundación del centro urbano y del entorno metropolitano de la ciudad de Panamá constituye uno de los riesgos que afectan de forma más significativa al futuro desarrollo sostenible de la misma.

Los cursos de agua (Figura 6) que atraviesan la ciudad se encuentran en gran parte canalizados, aunque no se realizan dragados y desbroces que mantenga los cauces limpios y eviten los desbordamientos. Lo mismo ocurre con los cursos de agua no naturales: los sistemas de drenaje de la ciudad están en malas condiciones de mantenimiento, colmatados por residuos y restos vegetales, lo que provoca que el agua se acumule en ciertos puntos de la ciudad durante la época de lluvias.

El crecimiento hacia el Este se está desarrollando actualmente en el Corredor Sur, donde se produce una fuerte presión urbanística entre las clases medias y altas, con la construcción de urbanizaciones cercanas a la costa, que recortan terrenos a los manglares. Hacia esta zona es donde discurren las aguas de escorrentía pluvial del entorno en la época de lluvias y la expansión de estas urbanizaciones impide por un lado la circulación natural del agua, y por otro genera una pérdida de permeabilidad, por lo que el terreno se anega con mayor frecuencia. El medio para reducir las pérdidas y daños por las inundaciones en las nuevas construcciones en esta zona consiste habitualmente en elevar el terreno, lo cual perjudica a las urbanizaciones de alrededor que reciben el agua de estas zonas más altas. Esta problemática se presenta en varios puntos de la ciudad.

Este estudio analiza el impacto que producen las inundaciones, tanto por desbordamiento de

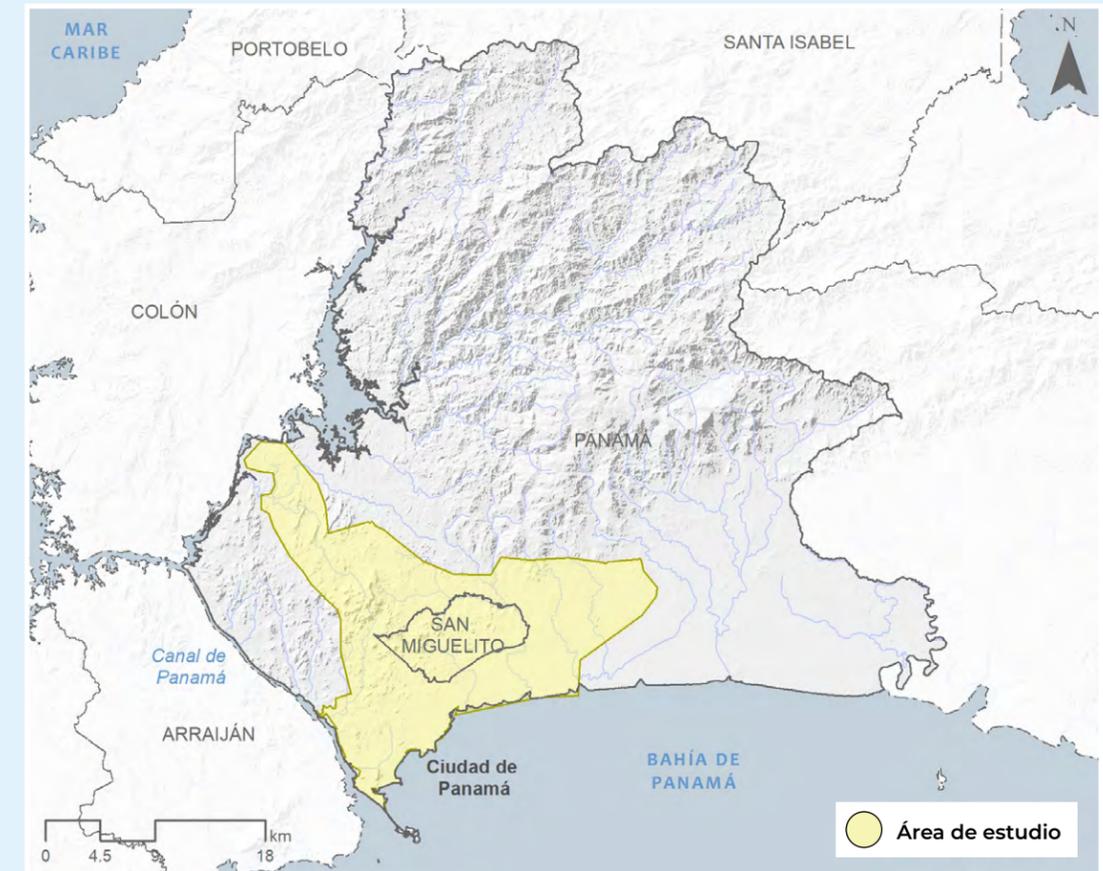
los ríos que atraviesan el área de estudio como por lluvias intensas, en el sistema de transporte en cada uno de los escenarios climáticos planteados.

La evaluación de la amenaza por inundación consta, fundamentalmente, de tres pasos: selección del área de estudio y delimitación de sus cuencas vertientes; caracterización del clima, atendiendo a la diferenciada distribución espaciotemporal de las lluvias extremas; y aplicación de un modelo hidrológico (para transformar los eventos de precipitación en caudales), y un modelo hidráulico (que a partir de la caracterización topográfica y de los caudales permite obtener la superficie inundable).

Área de estudio y delimitación de cuencas vertientes

La definición de área de estudio para la evaluación de la amenaza por inundación está condicionada fundamentalmente por (i) la extensión de la red de transporte urbano del área metropolitana de la Ciudad de Panamá, y (ii) la calidad de los datos topográficos disponibles para el desarrollo del estudio. Con base en la información disponible, las previsiones de crecimiento urbano, y las características hidrológicas del entorno de la ciudad, se establece un área de estudio que engloba el área consolidada del área metropolitana de la Ciudad de Panamá, localizada en los distritos de Panamá y San Miguelito, con una superficie de unos 370 km² (Figura 5).

Figura 5 Área de estudio para la evaluación de la amenaza por inundación



Fuente: elaboración propia, 2023.

En Panamá y San Miguelito no existe un cauce principal que atraviese esta zona, sino que la red hidrográfica existente se organiza en forma de pequeños cursos más o menos paralelos. En cada cuenca, estos ríos principales y sus afluentes diseñan un sistema dendrítico de avenamiento. Los ríos poseen altos perfiles

verticales y sus aguas alcanzan rápidamente a otros ríos o al mar. Dentro de estas cuencas se enmarca el área consolidada del ámbito de estudio, ocupando las cuencas de los ríos Chilibre, Cárdenas, Curundú, Matasnillo, Río Abajo, Matías Hernández, Juan Díaz, Tapia, Tocumen, y Cabra (Figura 6).



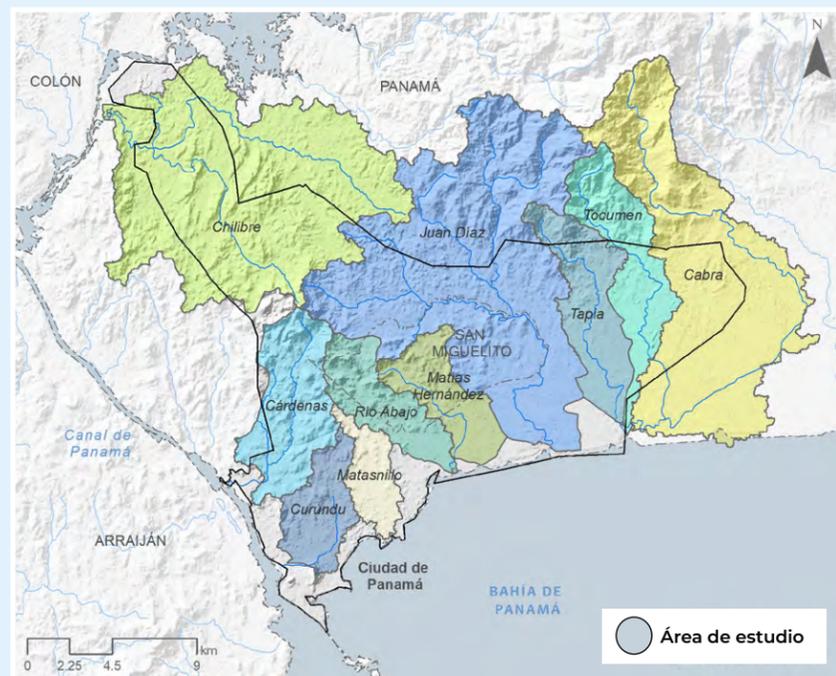
Cuadro 1

Características de las principales cuencas hidrográficas en Panamá y San Miguelito (área consolidada)

Cuenca	Área (km²)	L (km)
Chilibre	137.5	25
Cárdenas	34.0	7.5
Curundú	19.2	13.5
Matasnillo	13.0	7.9
Río Abajo	22.5	14.5
Matías Hernández	21.0	10.3
Juan Díaz	144.6	22.5
Tapia	30.8	17.2

Fuente: elaboración propia, 2023.

Figura 6 Red hidrográfica principal de Panamá y San Miguelito (área consolidada)



Fuente: elaboración propia, 2023.

Caracterización espaciotemporal de lluvias extremas actuales

La caracterización de las lluvias extremas se realiza por medio de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Estas curvas representan la relación matemática existente entre la intensidad de la precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa. La correcta caracterización estadística de la lluvia, sobre todo de corta duración, es muy importante para dimensionar el drenaje urbano y de esta manera evitar inundaciones súbitas en los centros poblados. Los datos de precipitaciones de las curvas IDF se han empleado para la determinación de los caudales que se emplearán en el cálculo hidráulico, mediante la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS.

Se dispone de información instrumental proveniente de 3 estaciones pluviométricas (Cuadro 2) con resolución horaria y con registros de al menos 30 años de duración en todos los casos, que se localizan dentro del área de estudio o próximos a la misma, y son representativas del régimen de precipitaciones de la zona. La información de las estaciones ha sido proporcionada por la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) y la Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA).

Cuadro 2

Localización de las estaciones pluviométricas (ACP y ETESA)

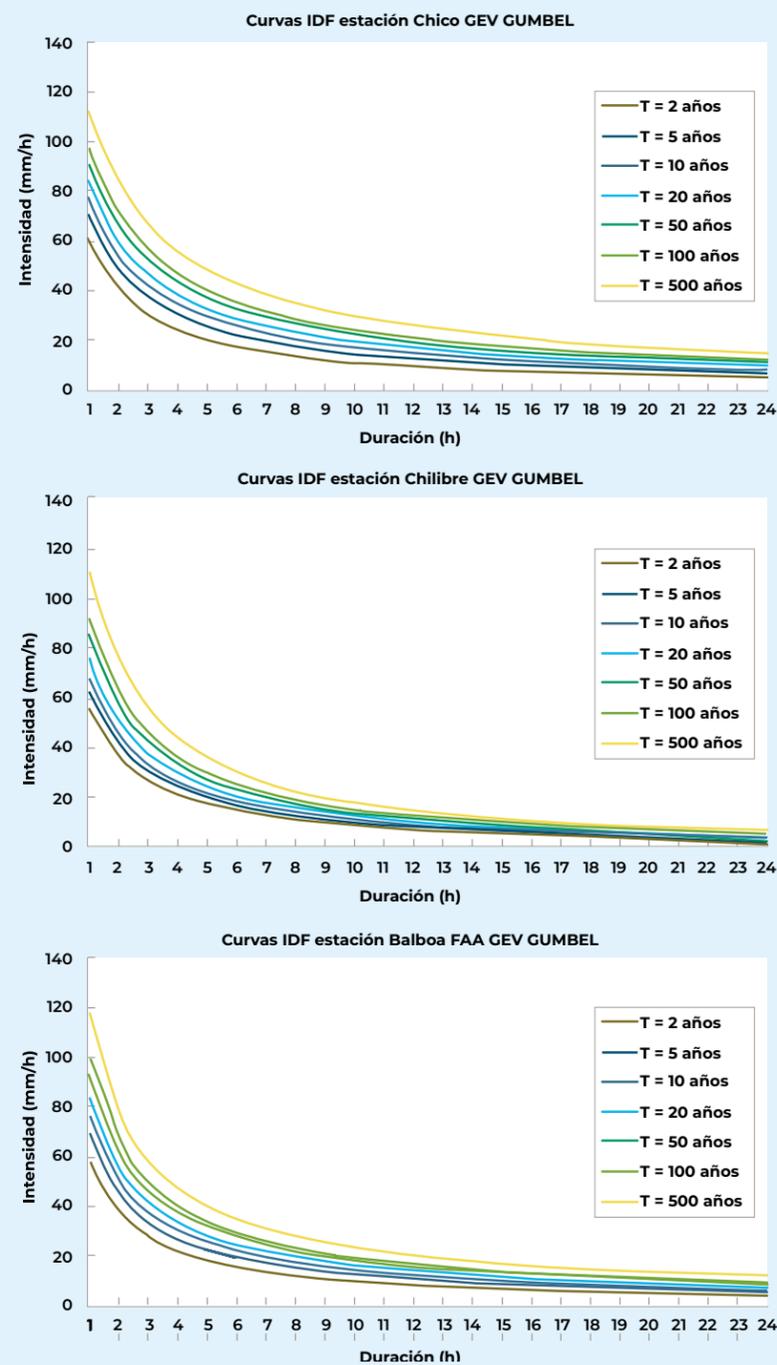
Estación	Coordenadas Geográficas (WGS 84)		Elevación (m)
	Longitud (o)	Latitud (o)	
Chico	-79.510	9.264	104
Balboa FAA	-79.554	8.982	10
Chilibre	-79.610	9.150	80

Fuente: elaboración propia, 2023.

En la Figura 7 se muestran las curvas IDF obtenidas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años para las estaciones citadas.



Figura 7 Curvas IDF para las estaciones de Chico, Chilibre y Balboa FAA en situación actual



Fuente: elaboración propia, 2023.

Caracterización espaciotemporal de lluvias extremas futuras

Para la caracterización climática futura, se han analizado los modelos globales denominados GCM (Global Climate Model). Estos modelos simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Son frecuentemente utilizados para el estudio de las dinámicas del sistema meteorológico y climático con el propósito de obtener proyecciones del clima futuro.

Aun así, el desconocimiento acerca de la posible evolución futura de la situación socioeconómica global hace necesario establecer escenarios de concentraciones de CO₂ mediante el uso de las denominadas trayectorias socioeconómicas compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways* o *SSP*). Estos SSP representan ciertas condiciones de emisión de gases de efecto invernadero (principalmente provenientes del desarrollo industrial) y cambios en el uso del suelo, que proporcionan situaciones de referencia para la simulación, de acuerdo con distintos escenarios plausibles de desarrollo socioeconómico.

El conjunto de datos NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections), cuyo acceso es proporcionado por la NASA, incluye proyecciones en escala reducida para SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de 21 modelos para los que se produjeron resultados de precipitación y temperatura. Además, la resolución espacial del conjunto de datos ofrecidos por este servicio es de 0.25 grados (~ 25 km x 25 km), lo cual permite hacer proyecciones locales y regionales, y mejorar la comprensión pública de posibles patrones climáticos globales a escala espacial de ciudades y cuencas individuales, casi mejor que muchos modelos regionales.

En línea de la Cuarta Comunicación de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente de Panamá, se seleccionan para el análisis los modelos MPI-ESM-1-2-HR y MPI-ESM-1-2-LR, para los tres SSP citados anteriormente y el horizonte temporal 2050 (2040-2060).

Al calcular las curvas IDF en el escenario climático futuro, solo para el SSP2-4.5 a 2050 se obtienen incrementos en el régimen extremal de precipitaciones, que aumentan gradualmente con el periodo de retorno llegando hasta casi un incremento del 50% para evento de 500 años de periodo de retorno. En cambio, para los SSP1-2.6 y SSP5-8.5 no se presentan cambios significativos, afirmando que el régimen de precipitaciones en situación actual es representativo de estos dos SSP a 2050 (Cuadro 3).



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles



Cuadro 3 Factor de ponderación para escenarios futuros para cada SSP y año horizonte por periodo de retorno.

Periodo de retorno (T)	SSP1-2.6 Horizonte 2050 (2040-2060)	SSP2-4.5 Horizonte 2050 (2040-2060)	SSP5-8.5 Horizonte 2050 (2040-2060)
2	1.055	1.127	1.101
5	1.022	1.156	1.060
10	1.014	1.185	1.035
20	1.018	1.220	1.014
50	1.046	1.276	0.994
100	1.087	1.327	0.984
500	1.274	1.477	0.976
Promedio	1.074	1.253	1.023

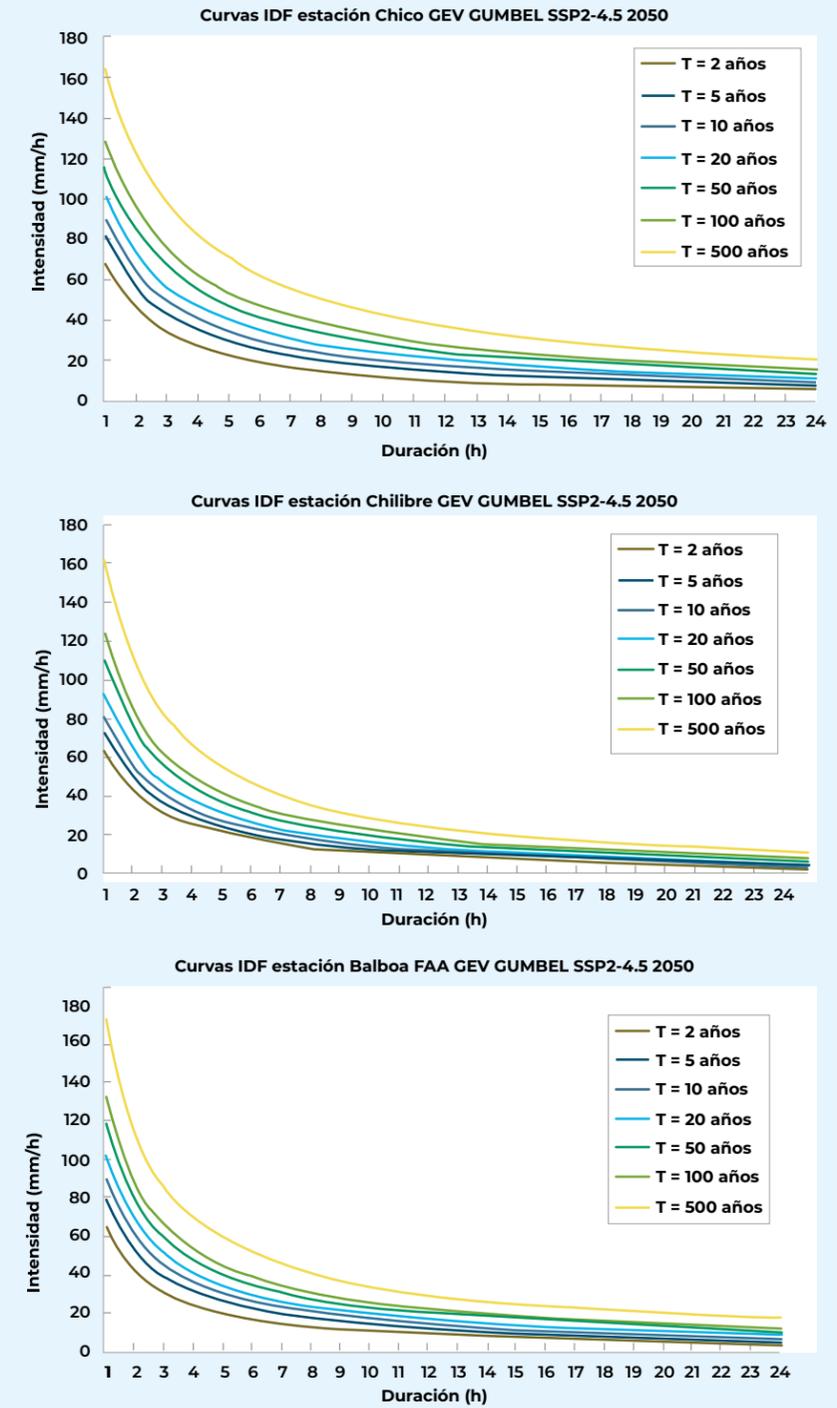
A la vista de los resultados, de aquí en adelante, se analizan los cambios en la amenaza de inundación únicamente para el SSP2-4.5, ya que se trata del escenario climático que supondrá un aumento en el riesgo de inundación, respecto de la situación actual.

En la Figura 8 se muestran las curvas IDF obtenidas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años para las estaciones seleccionadas en el SSP2-4.5 a 2050.



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

Figura 8 Curvas IDF para las estaciones de Chico, Chilibre y Balboa FAA en el SSP2-4.5 para el horizonte 2050



Fuente: elaboración propia, 2023.



Box 1. Curvas IDF



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

Las curvas IDF, o curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, son una herramienta fundamental en hidrología para estimar la intensidad de la lluvia en un lugar determinado, en función de su duración y la frecuencia con la que se espera que ocurra. En otras palabras, estas curvas nos permiten saber qué tan fuerte lloverá (intensidad), durante cuánto tiempo (duración) y cada cuánto tiempo se espera que ocurra una lluvia de esa intensidad y duración (frecuencia).

Las curvas IDF dependen de cada zona y pueden variar en espacios de km, sobre todo en zonas con topografía variada. Se utilizan habitualmente, junto con el denominado método racional, para el diseño de obras hidráulicas (culverts, sistema de drenaje, canales, etc.) en zonas urbanas o cuencas de pequeño tamaño, donde se requiere obtener un caudal máximo de diseño. La intensidad de lluvia del método es la que se obtiene de la IDF para el nivel de diseño (frecuencia) fijado y con una duración igual al tiempo de respuesta de la cuenca de estudio.

Las curvas IDF que se emplean en cada país o región suelen venir fijadas por una normativa técnica, ya que sus valores tienen gran incidencia sobre el dimensionamiento y el coste de muchas infraestructuras, desde sistemas de saneamiento a cunetas y pasos inferiores en las redes de transporte. Las curvas IDF reflejan el comportamiento extremo de la lluvia, y por tanto pueden experimentar alteraciones importantes debido al cambio climático; por ello, se recomienda revisarlas periódicamente e integrarlas a los códigos y manuales de diseño, a medida que se disponga de mejores proyecciones de clima futuro, como herramienta básica de adaptación.

Aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos

La amenaza de inundación es caracterizada por los niveles y velocidades que alcanza el agua en los tramos de estudio. Estas variables se obtienen a través del modelado hidrológico e hidráulico, que transforman los eventos de precipitación en caudales fluyentes, y, con base en la topografía de los cauces y las zonas adyacentes, definen los valores máximos de estas variables en determinados puntos.

Dentro del área de estudio se ha realizado un modelado hidrológico-hidráulico con el modelo bidimensional InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modeling), desarrollado por la empresa Innoyze, mientras que para el cálculo de caudales de aportación a esta área procedentes de la parte alta de las cuencas vertientes se ha aplicado el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU, ampliamente empleado para simular procesos de transformación precipitación-escorrentía en sistemas fluviales.

Como resultado del modelado numérico, se obtienen mapas de zonas inundables, caracterizadas por el calado o profundidad de la lámina de agua, para cada uno de los eventos de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno y escenarios climáticos analizados (situación actual y escenario con cambio climático SSP2-4.5 a 2050).

A modo de ejemplo, en la Figura 9 se muestra el mapa de calado obtenido para el evento de 100 años de periodo de retorno en el área de estudio.

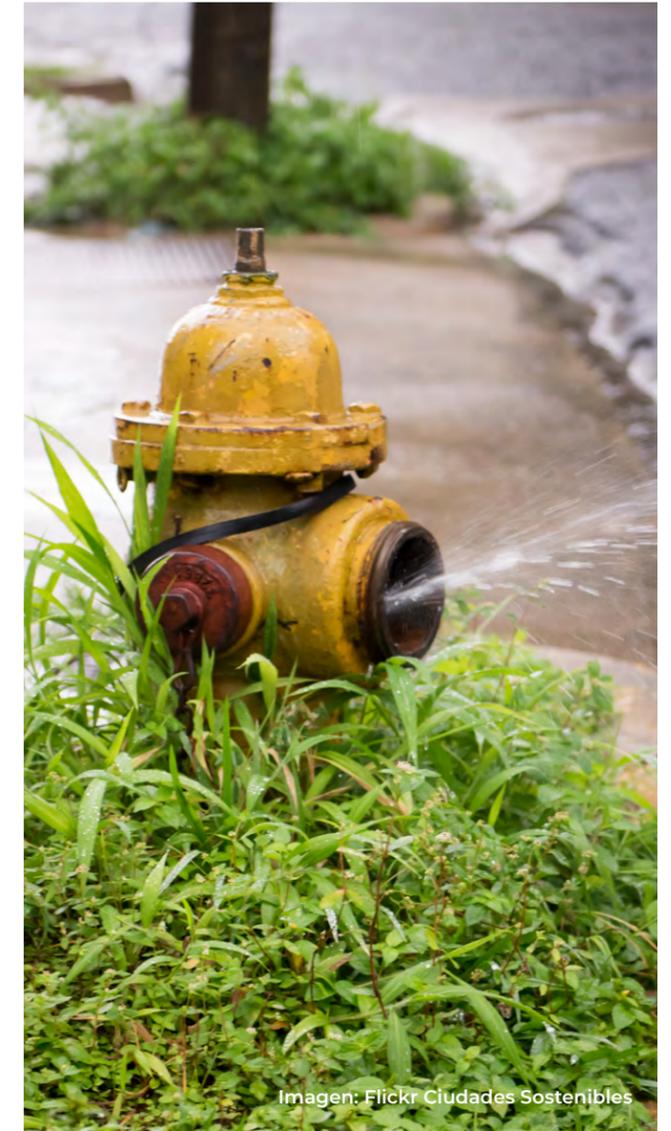
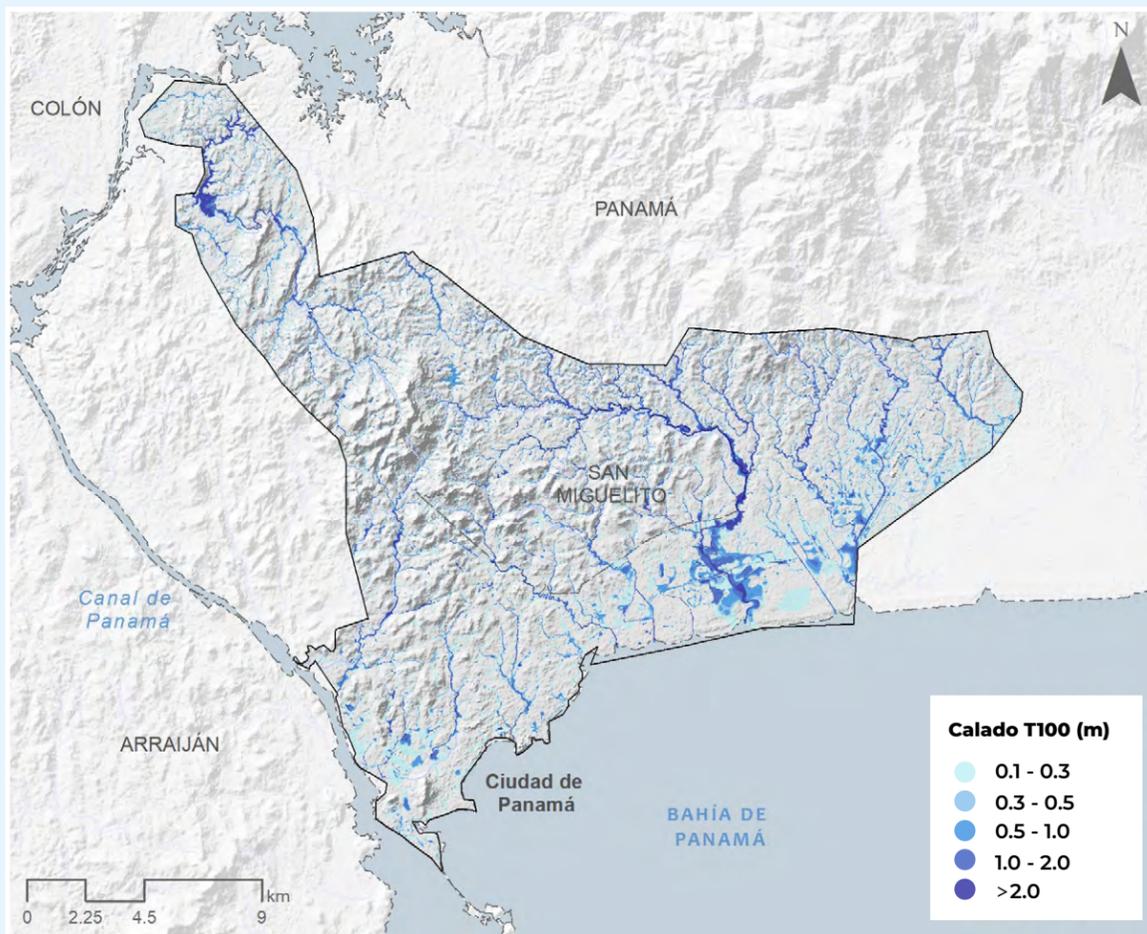


Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

El efecto del cambio climático se evalúa con las variaciones que se producen en las variables que caracterizan el peligro de inundación: superficie inundable y calado, respecto de la situación actual. Este análisis se llevó a cabo para las cuencas de los principales cauces del área de estudio: río Matasnillo, río Juan Díaz y río Chilibre (Cuadro 4).



Figura 9 Calados para el evento de 100 años de periodo de retorno en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, 2023



Cuadro 4 Cambios en las variables que caracterizan el peligro de inundación

T	Río Matasnillo		Río Juan Díaz		Río Chilibre	
	Superficie inundable (%)	Calado (m)	Superficie inundable (%)	Calado (m)	Superficie inundable (%)	Calado (m)
2	40.30	0.28	43.99	0.33	36.29	0.45
5	40.30	0.31	48.44	0.39	36.47	0.45
10	42.80	0.34	40.88	0.39	26.09	0.46
20	45.26	0.36	37.10	0.41	27.04	0.52
50	46.13	0.40	35.05	0.44	28.60	0.61
100	49.38	0.44	33.87	0.48	29.81	0.68
500	56.22	0.54	34.85	0.59	34.81	0.91
Promedio	45.77	0.38	39.17	0.43	31.30	0.58

Fuente: elaboración propia, 2023

Como se puede observar, la combinación del aumento del régimen extremo de precipitaciones y la impermeabilización de las cuencas debido al incremento de superficie urbana, en el horizonte 2050, resulta en un incremento significativo de la amenaza de inundación en el área de estudio. La superficie inundable incrementa de media entre un 30-45% y los calados incrementan de media 30-60 cm.

La caracterización obtenida de la amenaza de inundación en este apartado es la respuesta hidráulica de la situación actual a escala de

ciudad basada en la información disponible. Sin embargo, cabe mencionar que existen puntos críticos y activos de la red de transporte público, identificados por MiBus, afectados por problemas de drenaje a escala local y desbordamientos debidos a obstrucciones en el sistema por acumulación por residuos y restos vegetales, que no se reflejan en el modelado, y que se incorporarán al análisis de riesgos posterior. Adicionalmente, es importante destacar que, para análisis a escala local, donde los tiempos de concentración son inferiores a 1 hora, las curvas IDF deben ser ajustadas para no sobredimensionar las obras de drenaje local.



B Evaluación de la amenaza por ola de calor



Las olas de calor pueden definirse como periodos de temperatura anormalmente alta que se mantienen varios días y afectan a una parte importante de la geografía. Existen diversos criterios que definen este tipo de eventos en función de las variables analizadas (temperaturas máxima, media y mínima; humedad, etc.), del umbral de temperatura establecido (valor fijo o estadístico) y de la duración mínima del evento (días consecutivos por encima del umbral).

En este estudio se ha optado por evaluar la amenaza por ola de calor a través del cálculo del

Heat Index (HI), que combina la temperatura del aire y la humedad relativa para determinar una sensación térmica (WMO, 2015), ya que se trata de un indicador muy efectivo cuando la temperatura es superior a 26°C y la humedad es de al menos el 40%, como es el caso de Ciudad de Panamá. Con base en este indicador se puede establecer una clasificación de la peligrosidad en lo relativo a la salud humana, y asociar los efectos que el exceso de calor produce en el cuerpo para distintos rangos del Heat Index o sensación térmica (Cuadro 5).

Cuadro 5 Nivel de peligrosidad y efectos en el cuerpo para los diferentes rangos del Heat Index (HI) (NWS, 2024).

Peligrosidad	Heat Index (°C)	Efecto en el cuerpo humano
Precaución	27 - 32°C	Fatiga posible con exposición prolongada y/o actividad física
Precaución extrema	32 - 39.5°C	Golpe de calor, calambres por calor o agotamiento por calor posible con exposición prolongada y/o actividad física
Peligro	39.5 - 51°C	Es probable que se produzcan calambres por calor o agotamiento por calor, y posible golpe de calor con exposición prolongada y/o actividad física
Peligro extremo	> 51°C	Golpe de calor altamente probable

Fuente: NWS, 2024



Dada la escasez de datos instrumentales de temperatura y humedad, tanto espacial como temporalmente, en el área de estudio, para la obtención de series temporales de estas variables que sirvan para la evaluación de la amenaza por ola de calor, se han analizado los modelos globales denominados GCM. Para corregir los sesgos de las proyecciones climáticas de los GCM, se utilizó como referencia los datos de la estación Balboa FAA, localizada en el área urbana de Ciudad de Panamá.

Del mismo modo que para la precipitación, en línea de la Cuarta Comunicación de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente de Panamá, se seleccionan para el análisis los modelos MPI-ESM-1-2-HR y MPI-ESM-1-2-LR, para la situación actual y los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el horizonte temporal 2050 (2040- 2060). En el Cuadro 6 se recogen las variables climáticas obtenidas para la evaluación de la amenaza por olas de calor en Ciudad de Panamá, para los escenarios climáticos analizados.

Cuadro 6 Temperaturas y humedad medias asociadas a cada escenario climático analizado.

Escenario	Tmáx (°C)	Tmin (°C)	Humedad relativa (%)
Situación actual	31.7	23.9	87.6
SSP1-2.6 horizonte 2050	32.9	26.1	87.8
SSP2-4.5 horizonte 2050	33.2	25.1	87.7
SSP5-8.5 horizonte 2050	33.6	25.3	87.6

Fuente: elaboración propia, 2023.

Con base en estas series de temperatura y humedad se calcula, para cada escenario climático planteado, la sensación térmica (o *Heat Index*) media diaria, y se determina el número medio de días al año que el indicador se encuentra en cada rango de peligrosidad (Figura 10).



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles



Figura 10

Porcentaje de días al año en el que la sensación térmica se encuentra en cada uno de los niveles de peligrosidad para los escenarios climáticos analizados



Fuente: elaboración propia, 2023.

Como se puede observar, en situación actual, la combinación de temperatura y humedad sitúa a Ciudad de Panamá en los rangos de precaución la mayoría de los días del año (95%), con eventos puntuales que implican peligro (4%).

En el horizonte 2050, se produce un claro cambio de este estado, encontrándose la ciudad más de la mitad de los días al año en situación de precaución extrema (60-70%), y en peligro prácticamente el resto del tiempo (26-36%). Este patrón de cambio en la sensación térmica es similar para los tres SSP analizados, siendo más marcado en el SSP1-2.6.



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles



Evaluación de riesgo por olas de calor: Próximos pasos

Para completar la estimación del riesgo por olas de calor, se deben considerar la exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. En este caso, debido a la naturaleza de la amenaza considerada, la totalidad del sistema de transporte MiBus dentro del área de estudio se encuentra expuesta a los efectos de las olas de calor. La vulnerabilidad es más compleja de evaluar, al considerar que algunos de los componentes del sistema (autobuses y estaciones) son más susceptibles que la infraestructura urbana a los efectos el calor y

tienen mayor impacto en la operación en caso de falla. Por ejemplo, con mayores temperaturas, los autobuses requieren mayor capacidad en su sistema de aire acondicionado, lo que reduce la autonomía de las baterías e implica mayor frecuencia de recarga y menor vida útil. Este análisis requiere de un detalle de información no disponible en el momento del estudio, por lo que este documento no incluye la evaluación de riesgo por olas de calor, pero si da una primera aproximación a la identificación de la amenaza en la ciudad.



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

4.

EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN





Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

La evaluación de la exposición frente a la amenaza de inundación y de ola de calor engloba la identificación y caracterización de los elementos expuestos. Para ello, se elabora un inventario de activos expuestos (almacenados en una Geodatabase, en formato digital) donde se recopilan todos los activos físicos (los elementos que constituyen la red de transporte MiBus, es decir, paradas y centros de operación y ejecución, también llamados patios) y los activos sociales (usuarios de la red de transporte).

A Exposición física



Como se mencionó en la Sección 3a, el sistema de transporte urbano de MiBus cuenta con 1,470 paradas, 142 rutas, 6 centros de operación y ejecución (patios) y 1,436 autobuses. El análisis de la exposición física proporciona información del número de paradas y el área total de los patios que se superpondrá con la amenaza. Así, se obtiene el área expuesta, medida como el área total propensa a la amenaza, y los índices de exposición (proporción del área expuesta frente al área total). En la Figura 11 se puede apreciar la red de transporte MiBus en el contexto del área de estudio sobre la topografía real del

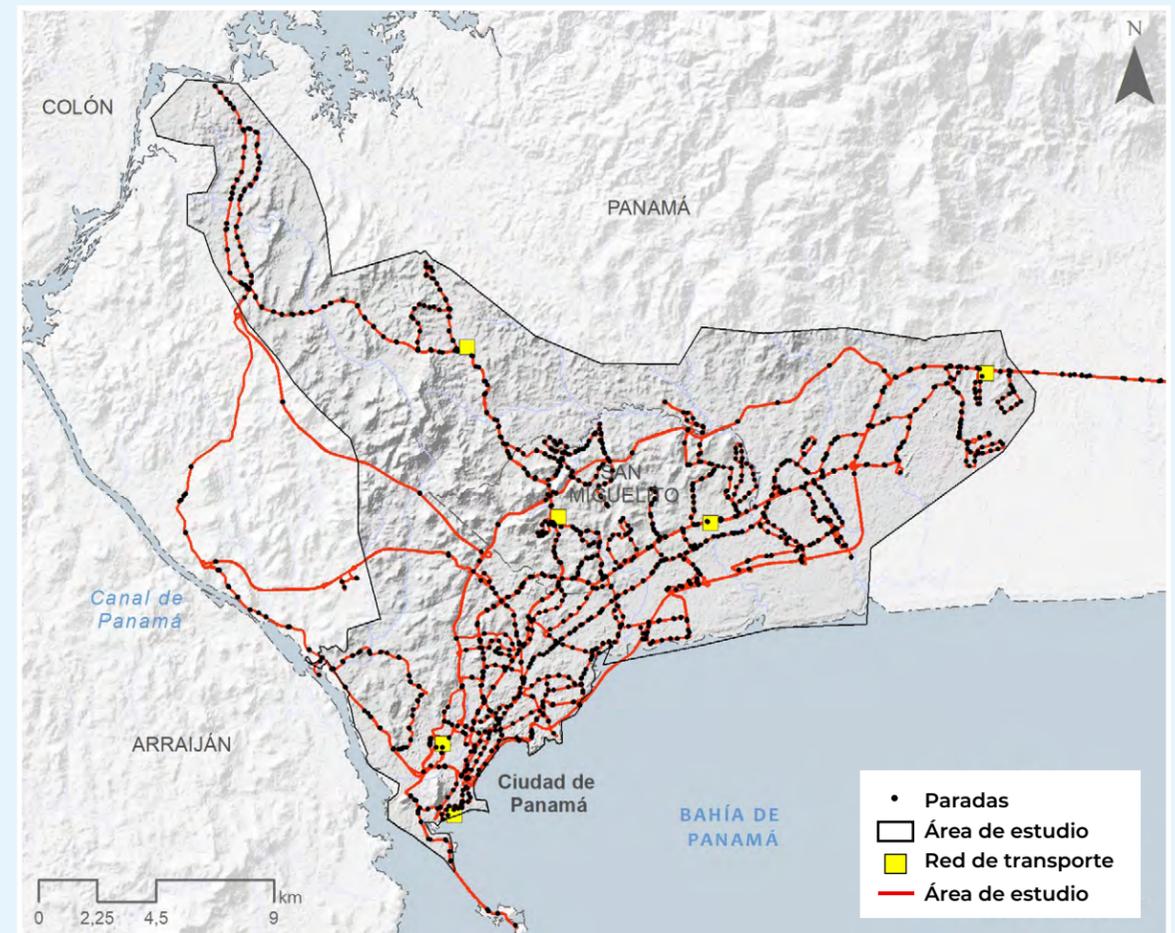
lugar, conformada por las rutas (en rojo), las paradas (en negro) y los centros de operación y ejecución o patios (cuadrados amarillos).

Los centros de operación y ejecución, o patios, son espacios delimitados que cuentan con edificios y un área para el estacionamiento de las unidades vehiculares de transporte (buses), y están acondicionados con modernas instalaciones para la operación y el mantenimiento integral de los vehículos. Los 6 patios de MiBus se encuentran dentro del área de estudio (Figura 12).



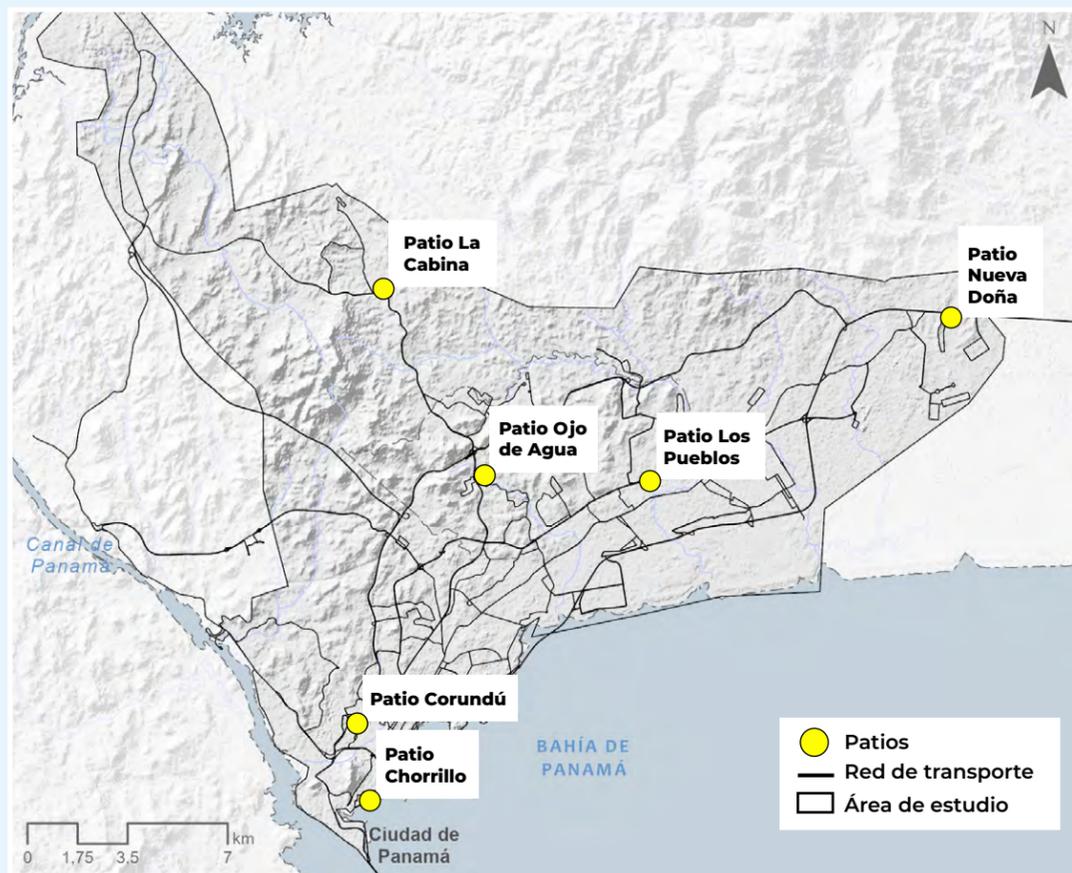
Figura 11

Red de transporte público MiBus. Fuente: elaboración propia a partir de información proporcionada por MiBus, 2023



Fuente: elaboración propia, 2023

Figura 12 Localización de los patios (centros de operación y ejecución) del sistema de transportes de MiBus



Fuente: elaboración propia, 2023

Resultados de la exposición física por inundación

Se presenta un resumen de los resultados de la exposición física para cada escenario considerado para los periodos de retorno de 5 y 100 años, que representan eventos de alta y baja probabilidad de ocurrencia respectivamente. Los elementos considerados están expuestos cuando el calado medio es superior a 0.5 m. Hay

que hacer notar que algunas de las paradas que en el modelo no resultan afectadas, sí que presentan inundación según el registro histórico aportado por MiBus, por lo que se han tomado en cuenta a efectos de la contabilidad de paradas afectadas (Cuadro 7).

Cuadro 7 Elementos afectados por inundación, en valores absolutos y en porcentaje sobre el total según periodo de retorno de 5 y 100 años

Elemento	Nº total	Elementos afectados T5	% respecto del total	Elementos afectados T100	% respecto del total
Situación actual					
Paradas	1,470	8	0.5	34	2.3
Patios	6	2	33.3	2	16.7
Total	1,476	10	0.7	36	2.4
Escenario con Cambio Climático (SSP2-4.5 a 2050)					
Paradas	1,470	29	2	91	6.2
Patios	6	1	16.6	3	50
Total	1,476	30	2	94	6.4

Fuente: elaboración propia, 2023.

En la situación actual, para el periodo de retorno de 5 años (evento de alta probabilidad), las cifras nos muestran la baja exposición que tienen las paradas, con 8 afectadas de las 1,470 consideradas, lo que representa el 0.5% del total. En el caso de los patios, se encuentran afectados 2 de los 6 existentes, lo que representa el 33,3%. La afectación por inundación del total de los elementos expuestos es del 0.7%.

Para el periodo de retorno de 100 años (evento de baja probabilidad) las paradas afectadas aumentan, como cabe esperar al tratarse de un periodo de retorno mayor, siendo 34, lo que supone un 2.3% del total. Sin embargo, en lo que respecta a los patios, se observa que dos son

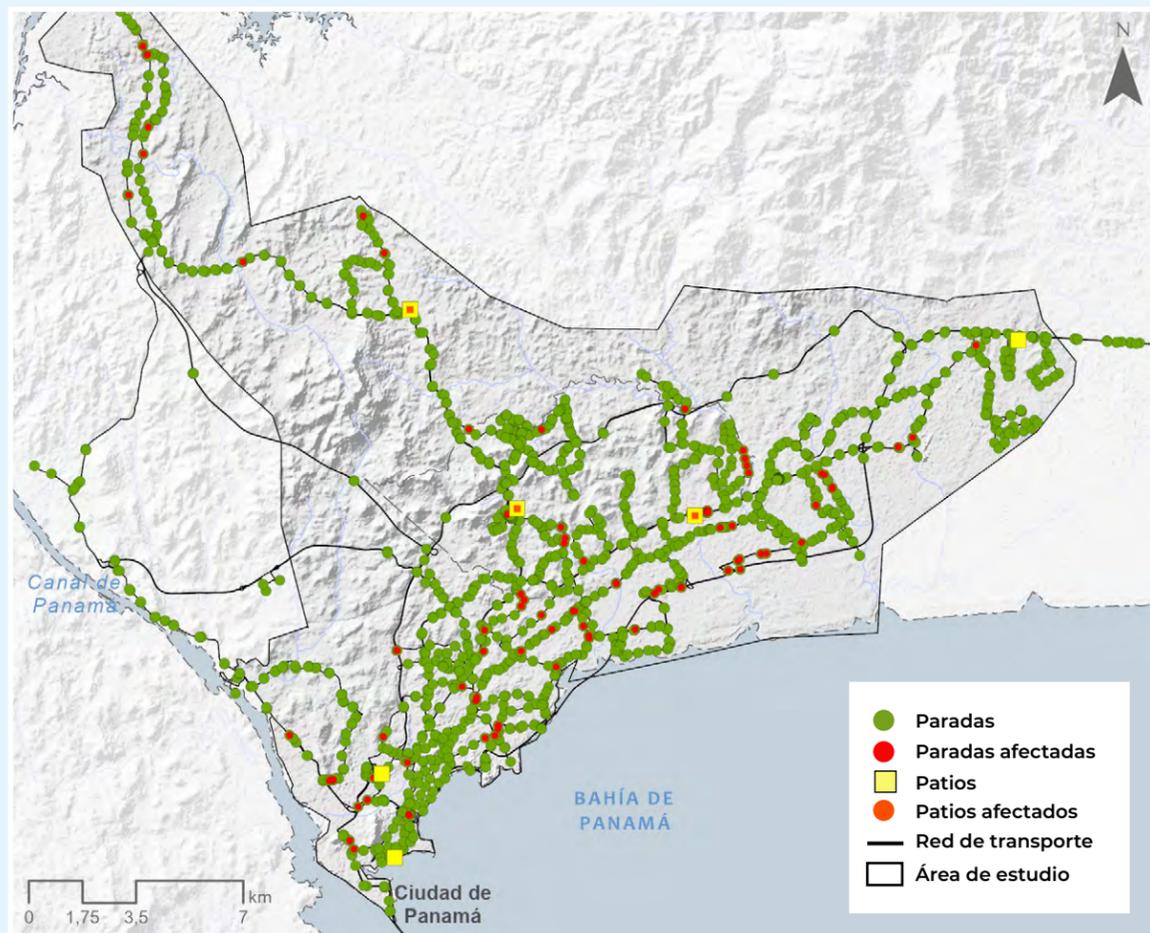
afectados en términos de altura y área inundada. La afectación por inundación del total de los elementos expuestos es del 2.4%.

En el escenario con cambio climático, las afectaciones para las paradas sufren aumentos para ambos periodos de retorno, estando afectadas 29 unidades, lo que supone el 2% del total para el periodo de retorno de 5 años (evento de alta probabilidad), y 91, un 6.2% del total, para el periodo de retorno de 100 años (evento de baja probabilidad) (Figura 13). La afectación por inundación del total de los elementos expuestos para este escenario es del 2% y del 6.4% según se trate del periodo de retorno de 5 años o de 100.



Figura 13

Elementos de la red de transporte público donde se pueden observar los patios, las paradas (en verde) y las paradas afectadas (en rojo) en el escenario con cambio climático para T100



Fuente: elaboración propia, 2023.



Cuadro 8

Elementos afectados por inundación, en valores absolutos y en porcentaje sobre el total según periodo de retorno de 5 y 100 años

Nombre	Área (m2)	Calado medio T5 (m)	Área afectada T5 (m2)	% respecto del total	Calado medio T100 (m)	Área afectada T100 (m2)	% respecto del total
Situación actual							
La Cabima	32,444.86	0.54	1,056	3.3	0.63	2,092	6.4
El Chorrillo	16,447.39	0.13	784	4.8	0.14	1,344	8.2
Curundú	47,004.29	0.37	1,832	3.9	0.13	27,068	57.6
Nueva Doña	4,4546	0.35	3,264	7.3	0.34	3,624	8.1
Los Pueblos	30,639.74	0.38	21,376	69.8	0.41	23,044	75.2
Ojo de Agua	44,177.50	0.55	3,304	7.5	0.42	9,412	21.3
Escenario con Cambio Climático							
La Cabima	32,444.86	0.63	1,796	5.5	0.55	3,576	11.0
El Chorrillo	16,447.39	0.13	1,052	6.4	0.15	1,864	11.3
Curundú	47,004.29	0.13	25,064	53.3	0.17	46,304	98.5
Nueva Doña	4,4546	0.35	3,308	7.4	0.35	3,692	8.3
Los Pueblos	30,639.74	0.39	22,820	74.5	0.98	28,232	92.1
Ojo de Agua	44,177.50	0.41	9,844	22.3	0.48	19,256	43.6

Fuente: elaboración propia, 2023

Se recalca que los calados presentados y, en consecuencia, la presumible afectación de los elementos del sistema de transporte, son resultado de la aplicación de un modelo hidrológico sobre una topografía digital; el detalle de esta, así como el ajuste de las curvas IDF para periodos de retorno inferiores a 1 hora y la inclusión de elementos de drenaje y saneamiento, marcan la diferencia y posibilitan resultados más precisos. Sería adecuado detectar y seleccionar zonas que pudieran ser objeto de un estudio de detalle para conocer con mayor precisión lo que sucede con la inundación en ellas. Los comentarios realizados por MiBus sobre cómo afecta la inundación a

los distintos patios ofrece información sobre los eventos de inundación de periodo de retorno bajo dado que son perceptibles desde hace tan solo unos años.

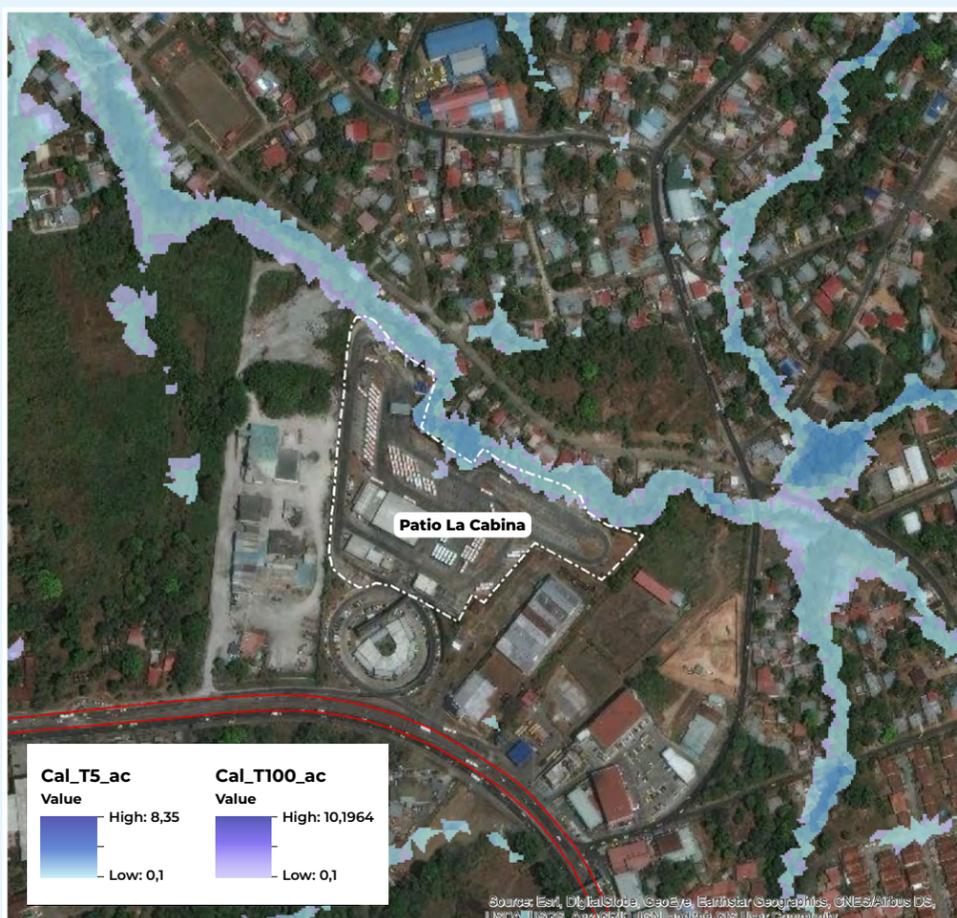
Según los comentarios de MiBus al patio La Cabima no se le conocen eventos de inundación. Según los datos del modelo, los calados de cierta importancia, es decir a partir de 0.5 m, se dan en la pequeña quebrada que limita con el patio en su lado norte, pero no supone afectación alguna para el funcionamiento del patio (Figura 14). En cambio, el patio Ojo de Agua sí presenta cierta inundación según lo observado y comunicado por MiBus. Éste se encuentra localizado sobre



un antiguo cauce que fue desviado, y las lluvias muy fuertes sobrepasan el nivel de rodadura en el nuevo cauce, que se encuentra limitando por el norte al patio, aunque no son inundaciones de grandes calados (Figura 15). Por su parte, el patio Los Pueblos también sufre inundaciones y el MOP tiene constancia de ello (Figura 16). De hecho, se realizan dragados en los drenajes

en las calles circundantes con el objetivo de evitar las inundaciones. Este caso forma parte del problema de drenaje de la zona de Juan Díaz. Para reducir las pérdidas y daños, MiBus ha decidido no renovar el contrato de arrendamiento en este lote, y próximamente será relocalizado en un área más cercana al aeropuerto.

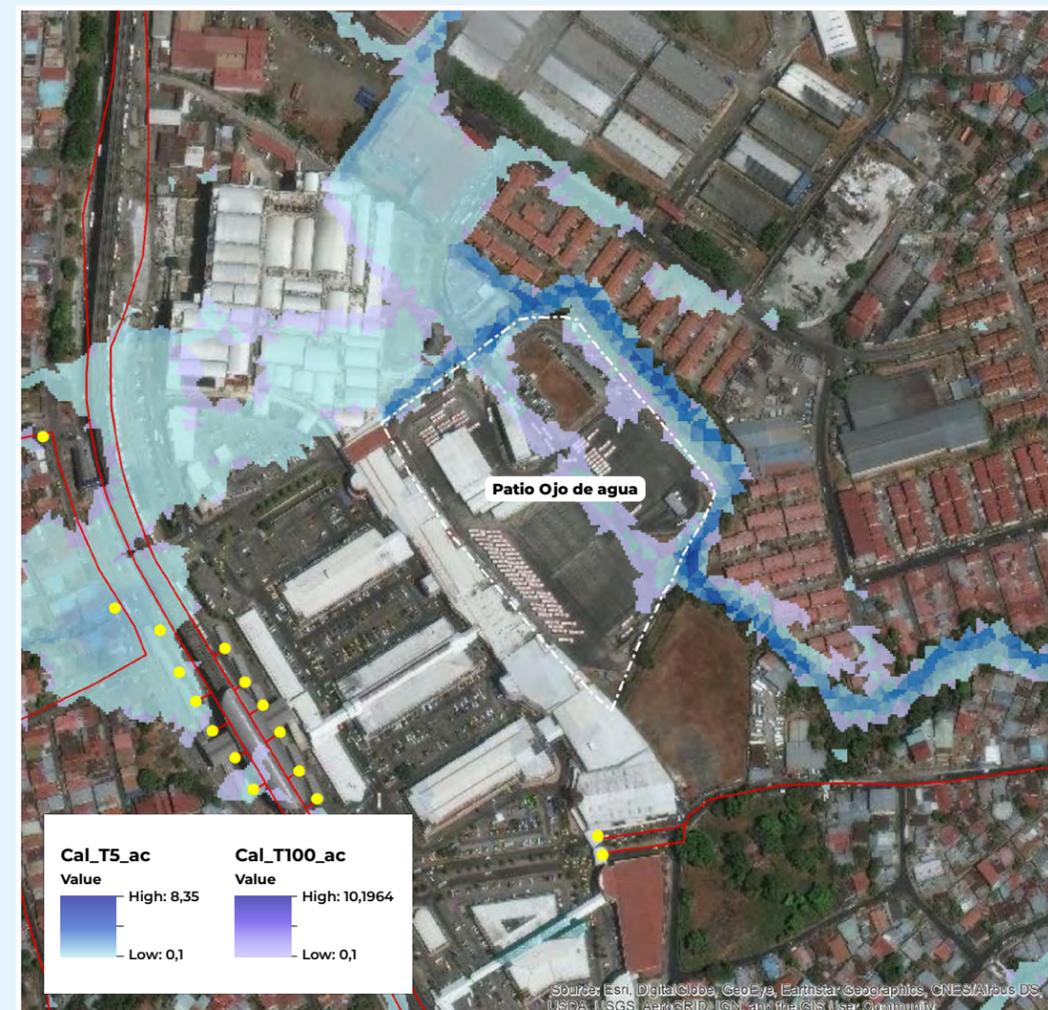
Figura 14 Patio La Cabima con indicación de los calados para los periodos de retorno de 5 y 100 años para la situación actual



Fuente: elaboración propia, 2023.



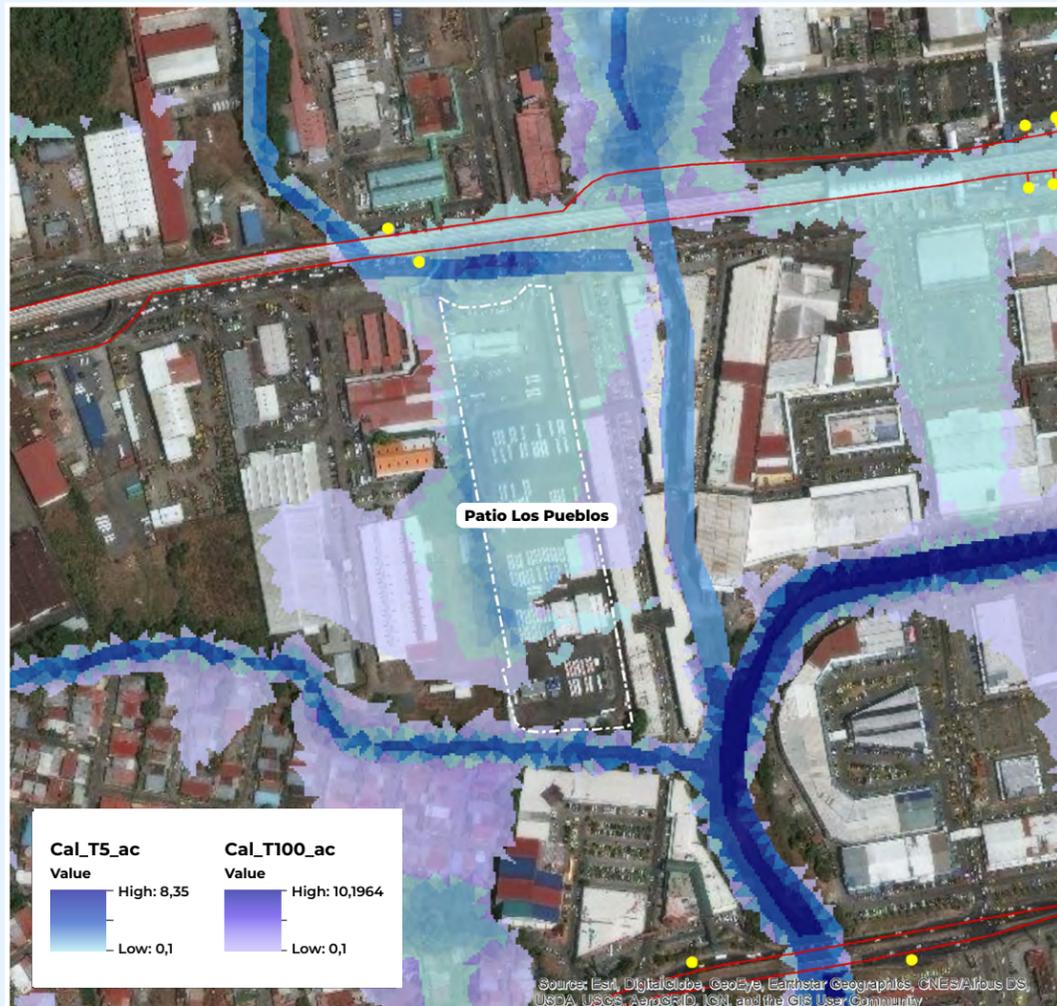
Figura 15 Patio Ojo de Agua con indicación de los calados para los periodos de retorno de 5 y 100 años para la situación actual



Fuente: elaboración propia, 2023.



Figura 16 Patio Los Pueblos con indicación de los calados para los periodos de retorno de 5 y 100 años para la situación actual



Fuente: elaboración propia, 2023.

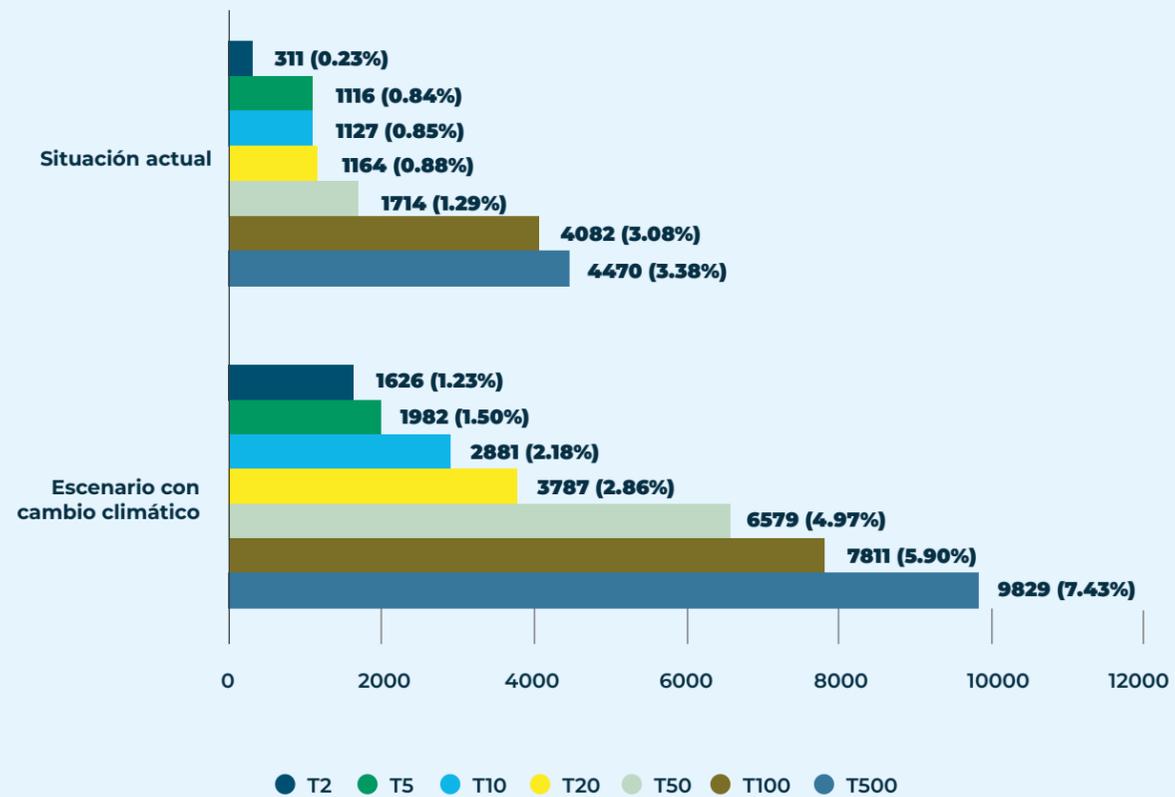
B Exposición Social



La exposición social se refiere inicialmente a la cantidad de personas expuestas a una amenaza en particular. Se considera la exposición social ya que este estudio de riesgo se centra en las consecuencias a la población ocasionadas por la afectación de las inundaciones a la red de transporte, y en este caso en particular, la afectación a usuarios/viajeros.

La Figura 17 muestra el total de los usuarios medios por día expuestos según periodo de retorno de la inundación, y su porcentaje respecto del total de usuarios diario para los escenarios estudiados.

Figura 17 Población expuesta para los distintos periodos de retorno



Fuente: elaboración propia, 2023.



Como se puede observar, para la situación actual la exposición a los usuarios es menor al 1% en periodos de retorno frecuentes (bajo periodo de retorno), mientras que, para periodos de retorno de baja probabilidad, comienzan a ser algo más importantes. La estimación de potenciales afectados no considera los impactos indirectos de la interrupción del funcionamiento normal del sistema de transporte, que, en una ciudad de las dimensiones de Ciudad de Panamá, supone un trastorno importante para el metabolismo

de la ciudad y el desarrollo de las actividades de sus habitantes.

Para el escenario con cambio climático, en el cual se prevé un incremento de las precipitaciones, las cifras de usuarios afectados aumentan con respecto a la situación actual para todos los periodos de retorno y solo suponen cifras mayores al 5% en periodos de retorno de muy baja probabilidad.



5.

EVALUACIÓN DEL RIESGO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO





A Evaluación del riesgo por inundación



En este capítulo se cuantifican los riesgos de inundación en Ciudad de Panamá, para la situación actual y el escenario de cambio climático SSP2-4.5 a 2050, y para los periodos de retorno de 5 años, el de mayor probabilidad, y el de 100 años, el de menor probabilidad, pero mayor intensidad. Los impactos se centrarán en la capacidad afectada, estimando la merma de capacidad que un evento genera en el

sistema. Se emplean para ello un conjunto de curvas de daño, que relacionan los calados de agua con la pérdida de servicio que conllevan. Se consideran tres categorías de evento de inundación, definidas por el calado máximo alcanzado durante la tormenta (Cuadro 9) y que afecta tanto la circulación en las vías como la seguridad de las estaciones.

Cuadro 9 Categorías de amenaza según calado medio

Evento leve	menos de 1 m de calado medio en la zona, en el instante pésimo.
Evento moderado	entre 1 y 1.5 m de calado medio en la zona, en el instante pésimo.
Evento grave	más de 1.5 de calado medio en la zona, en el instante pésimo

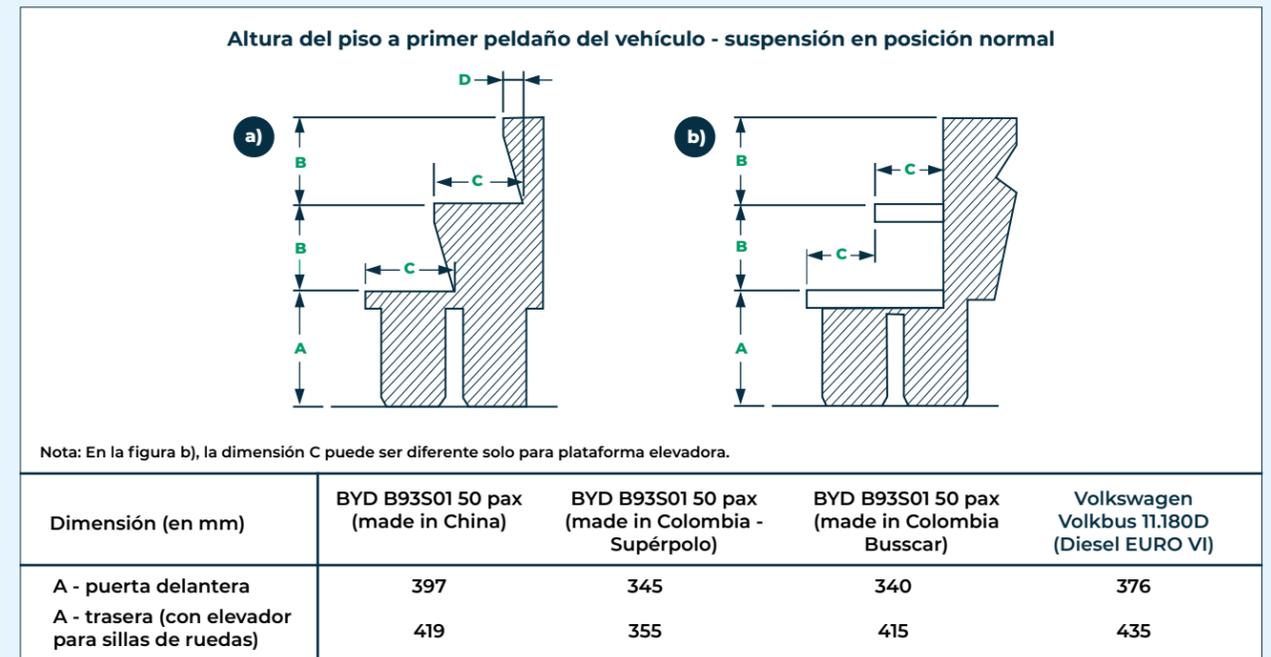
Fuente: elaboración propia, 2023

Adicionalmente, los sistemas de transporte requieren interrumpir su operación incluso antes de que se produzca una falla de la infraestructura, porque los autobuses no pueden circular ya que el agua puede ingresar por el escape y llegar a la entrada de aire, afectando la potencia del motor. Otro aspecto que limita la operación de los autobuses es cuando la lámina de agua supera el nivel inferior de la puerta de acceso, lo que puede dificultar el mecanismo de activación de la puerta e impedir su apertura, y el ascenso y descenso de pasajeros. A mayores alturas de inundación,

incluso el vehículo puede flotar y ser peligroso para los usuarios y operarios. En el caso de los buses de servicio público, en la Figura 18, se muestra la altura desde la superficie de pavimento hasta el primer y segundo escalón de ingreso a un bus eléctrico, a esta última queda el nivel del piso del bus, donde están los pasajeros. La altura del piso del bus varía de 34 cm a 44 cm, dependiendo del fabricante; por lo anterior, se considera que la operación de un bus se debe suspender cuando la lámina de agua supera los 50 cm.



Figura 18 Altura del piso al nivel del piso de un bus eléctrico



Fuente: Datos de la Rolita, Bogotá, 2023

La identificación de elementos expuestos, asociados a la infraestructura urbana, se realizó definiendo un área de potencial inundación a partir de un modelo digital del terreno, que incluye las estaciones como puntos sobre las

vías donde están ubicadas. Es así como como la identificación de las paradas con potencial de inundación permite determinar los tramos de vía afectados.

Impacto de las inundaciones en la situación actual

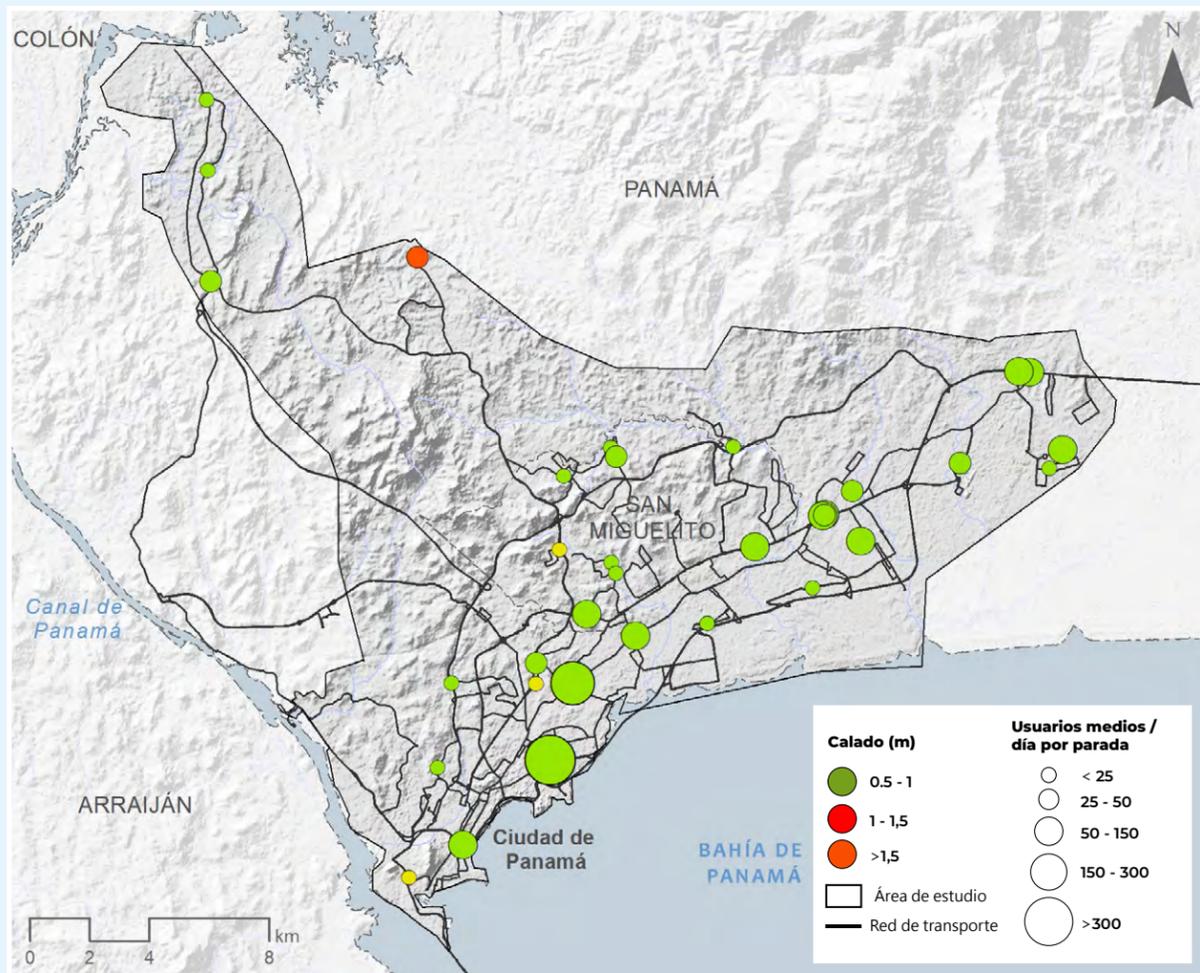
En general, en las paradas afectadas por la inundación de T5 años de periodo de retorno, considerada como representativa de los eventos ordinarios, los calados no superan el metro de altura, existiendo únicamente una parada con inundación de calado superior a 1 metro (Figura 19). Se estima que unos 1,116 usuarios medios por día serían afectados por inundaciones mayores a 0.5m de calado para el período de retorno T5 (Cuadro 10).



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles



Figura 19 Usuarios medios diarios afectados por parada según su calado para la inundación de T5 años en situación actual



Fuente: elaboración propia, 2023

Cuadro 10 Usuarios medios día según calado y periodo de retorno para la situación actual

Periodo de retorno (años)	Calado (m)			
	>0.3 m	>0.5 m	>1 m	>1.5 m
T2	1,434	311	47	47
T5	1,580	1,116	47	47
T10	2,034	1,127	49	49
T20	2,180	1,164	49	49
T50	5,141	1,714	939	81
T100	6,203	4,082	1,130	81
T500	7,478	4,470	2,941	85

Fuente: elaboración propia, 2023

En la situación actual, un total de ocho (8) paradas quedan afectadas por inundaciones frecuentes: Chilibrillo-R, Clayton-R Control,

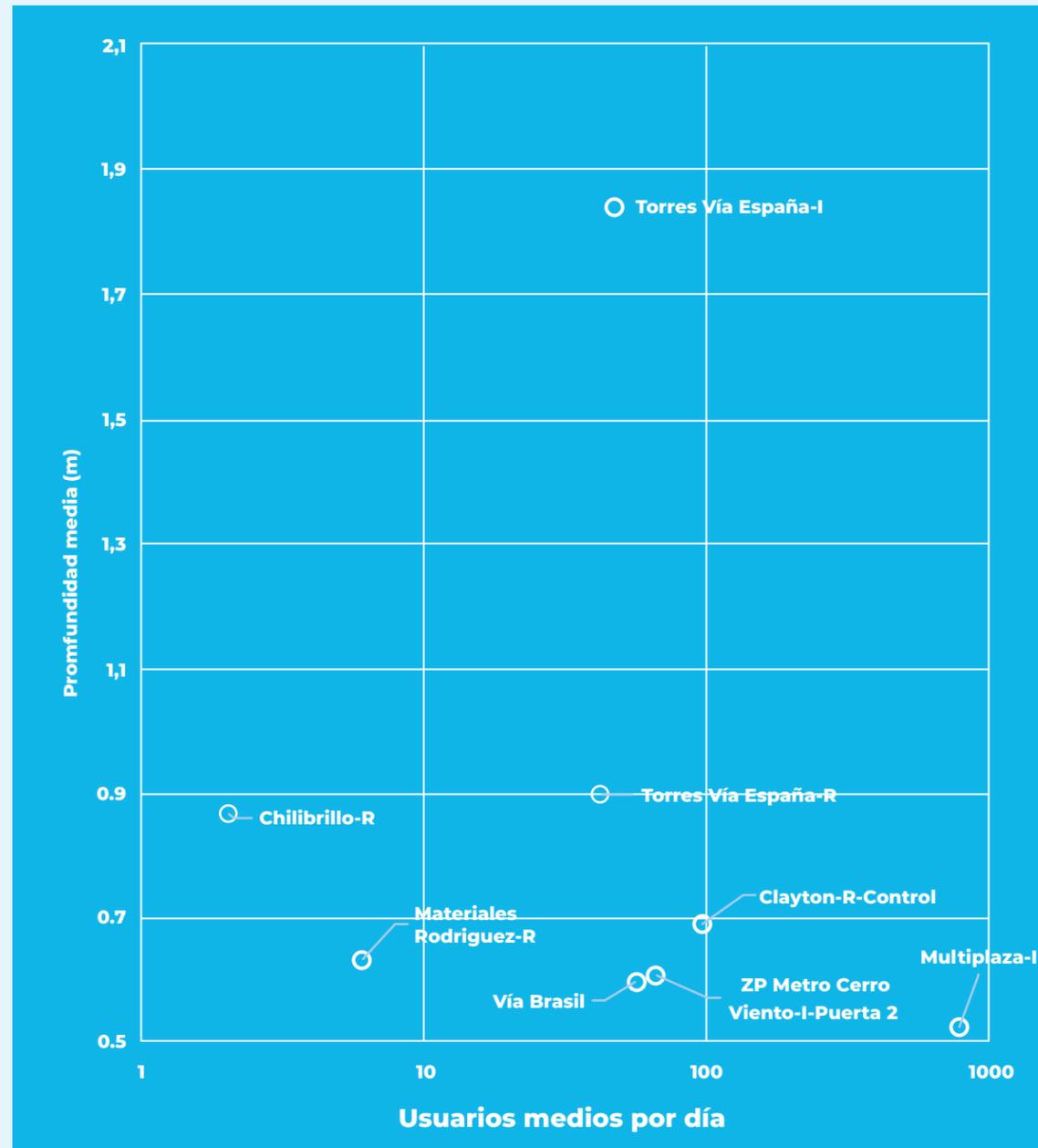
Materiales Rodríguez-R, Multiplaza-I, Torres Vía España-R, Torres Vía España-I, Vía Brasil, y Zona Paga Metro Cerro Viento-I (Figura 20).



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles



Figura 20 Usuarios medios por día y parada según la profundidad media de la inundación para T5 años por parada para la situación actual.

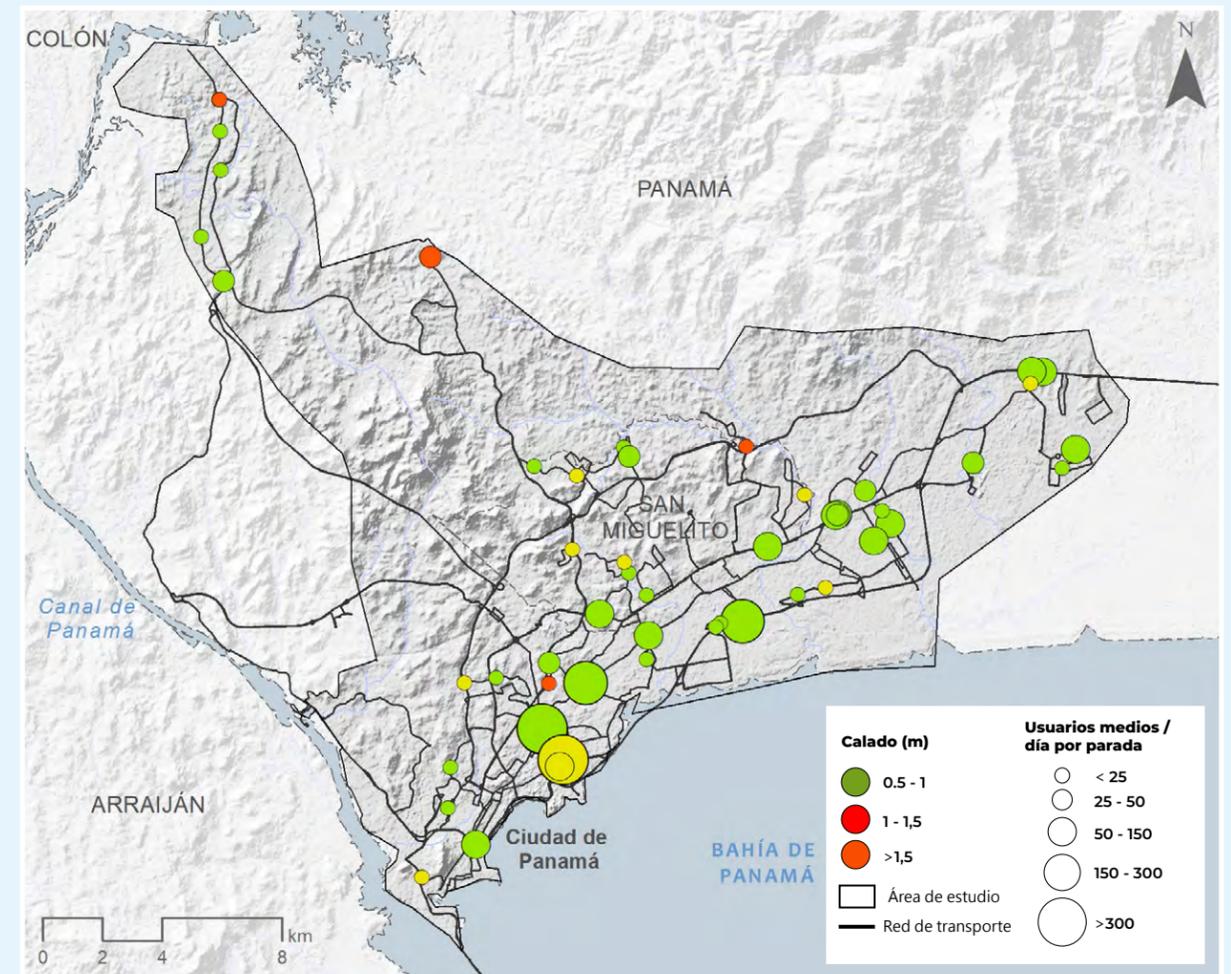


Fuente: elaboración propia, 2023.



Para la inundación de T100 años, la cantidad usuarios medios por día afectados por calados mayores a 0.5m asciende a 4,082 (Cuadro 10).

Figura 21 Usuarios medios diarios afectados por parada según su calado para la inundación de T100 años en situación actual



Fuente: elaboración propia, 2023.



Figura 22 Usuarios medios por día y parada según la profundidad media de la inundación para T100 años por parada para la situación actual



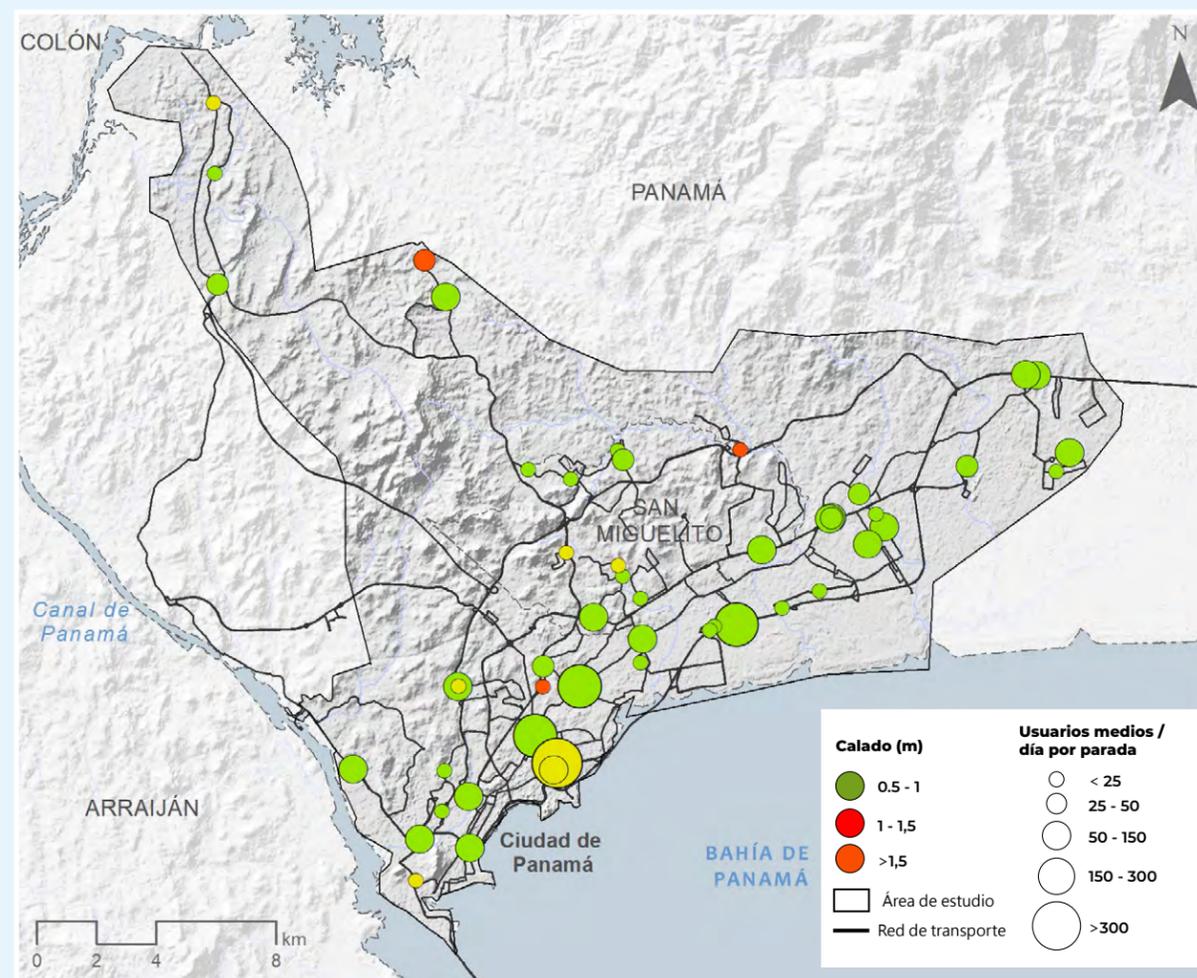
Fuente: elaboración propia, 2023

Impacto de las inundaciones para el escenario de cambio climático SSP2-4.5 a 2050

La situación para la inundación T5 años en el escenario con cambio climático presenta mayor número de paradas afectadas que su homólogo en situación actual, y algunas de las paradas que se inundan con mayores calados tienen mayor número de usuarios. Concretamente, las paradas

cercanas al centro comercial Multiplaza, en Punta Pacífica, presentan calados importantes y un número de usuarios elevado (Figura 23). El número de usuarios medios por día afectados en este escenario es de 1,982 (Cuadro 11).

Figura 23 Usuarios medios diarios afectados por parada según su calado para la inundación de T5 años en el escenario SSP2-4.5.





Cuadro 11 Usuarios medios día según calado y periodo de retorno para el escenario SSP2-4.5.

Periodo de retorno (años)	Calado (m)			
	>0.3 m	>0.5 m	>1 m	>1.5 m
T2	3,029	1,626	81	72
T5	4,684	1,982	1,042	79
T10	5,120	2,881	1,203	79
T20	5,888	3,787	1,291	150
T50	9,293	6,579	1,786	1,150
T100	10,180	7,811	3,786	1,197
T500	11,603	9,829	5,167	3,376

Fuente: elaboración propia, 2023

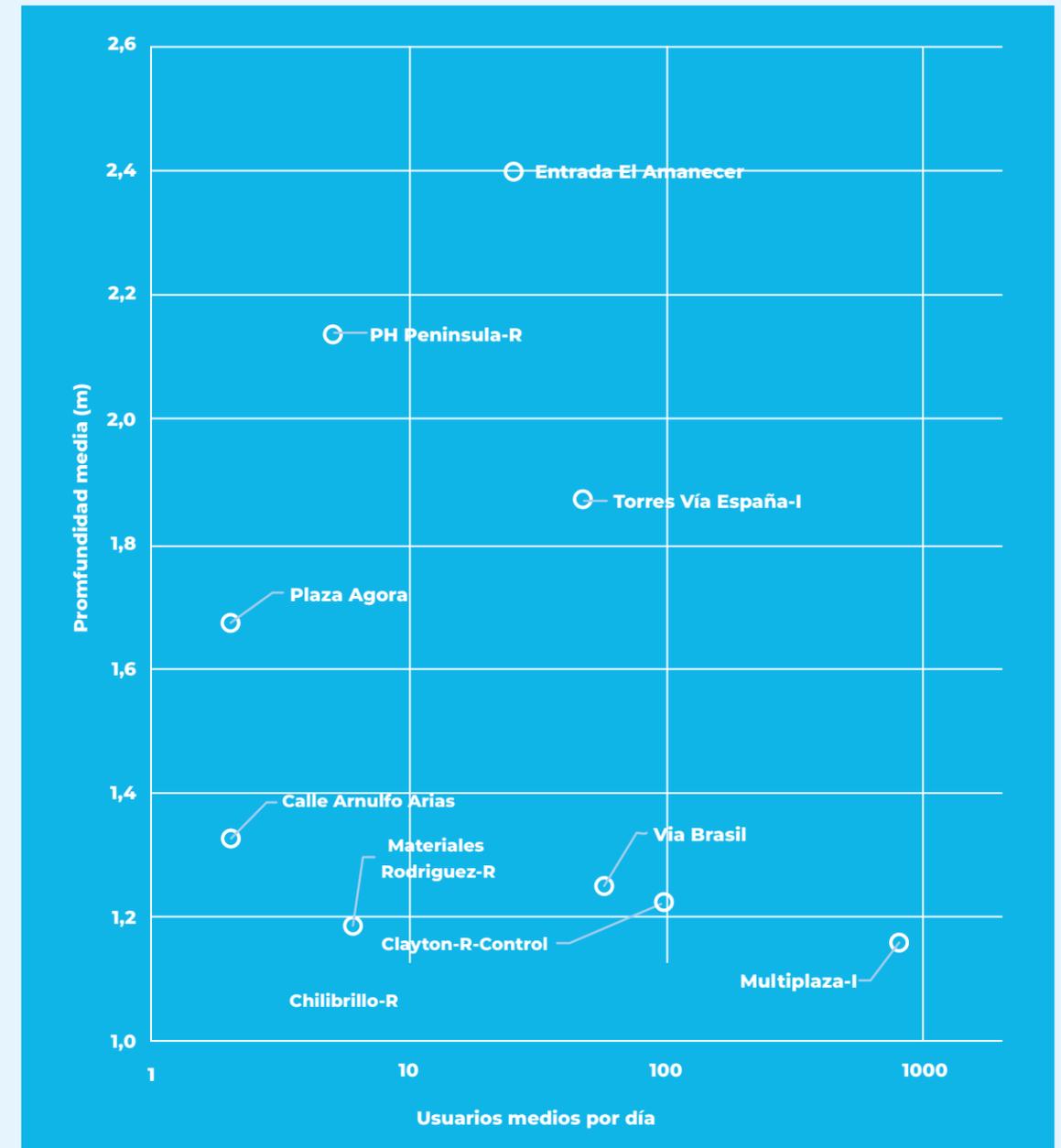
El número de paradas afectadas por calados mayores a 0.5 m por la inundación de 5 años de periodo de retorno para el escenario de cambio climático asciende a 29, con un aumento de más de 250% respecto a la situación actual

en el mismo periodo de retorno. En la Figura 24 únicamente se representan aquellas que quedan afectadas por calados mayores a 1 metro.



Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

Figura 24 Usuarios medios por día y parada según la profundidad media de la inundación para T5 años por parada para el escenario SSP2-4.5



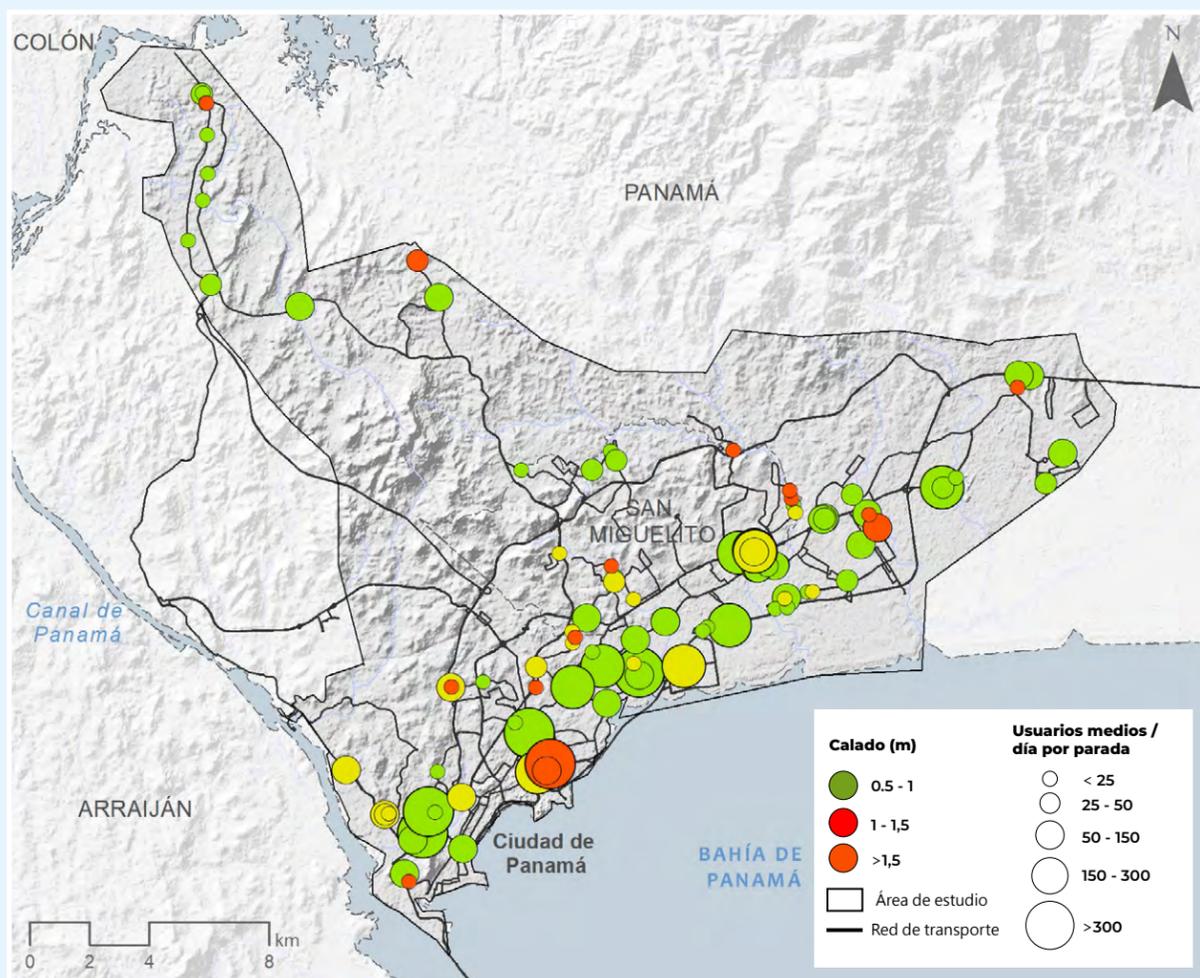
Fuente: elaboración propia, 2023



La situación en Ciudad de Panamá para la inundación de T100 años en el escenario con cambio climático (SSP2-4.5) presenta el panorama más complicado de entre los analizados, como se esperaría de un evento de inundación de características más extremas. El número de usuarios afectados se incrementa a

un total de 7,811 en eventos con calados mayores a 0.5m (Cuadro 11), doblando la cantidad de usuarios afectados para el mismo periodo de retorno en la situación actual. Se observa en este escenario la aparición de una cantidad considerable de paradas con calados mayores a 1.5m.(Figura 25).

Figura 25 Usuarios medios diarios afectados por parada según su calado para la inundación de T100 años en el escenario SSP2-4.5

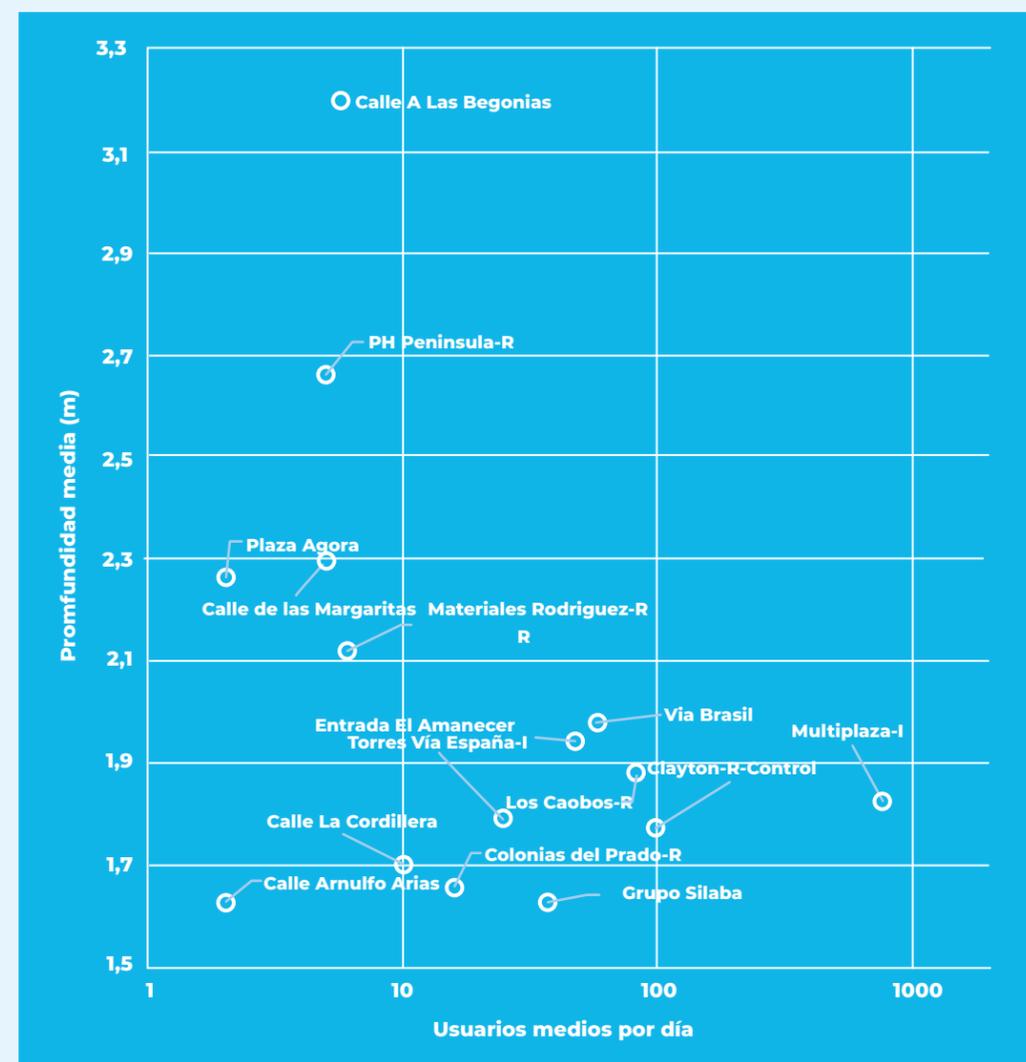


Fuente: elaboración propia, 2023

En este escenario, 91 paradas quedan afectadas, lo que representa un incremento del 167% de las afectaciones en la situación actual para el

mismo periodo de retorno. De estas, quince (15) son afectadas con una profundidad media de inundación mayor a 1.5m (Figura 26).

Figura 26 Usuarios medios por día y parada según la profundidad media de la inundación para T100 años por parada para el escenario SSP2-4.5



Fuente: elaboración propia, 2023

De las paradas estudiadas, Multiplaza-I es la que presenta la mayor cantidad de usuarios por día, y es afectada en todos los periodos de retorno, tanto en la situación actual como en el escenario de cambio climático SSP2-4.5.

6.

SELECCIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE INTERVENCIÓN





Imagen: Adobe Stock

Uno de los objetivos del estudio es detectar aquellas zonas donde se requieren proyectos de adaptación al clima, actual o futuro, como condición necesaria para garantizar la integridad y durabilidad de los nuevos proyectos de electrificación de la flota de autobuses. Se han obtenido las áreas prioritarias de intervención mediante un análisis que combina factores de amenaza/riesgo con los siguientes criterios:

➔ Paradas que se encuentran en líneas que pertenecen a los patios que serán electrificados de forma prioritaria (Chorrillo y Curundú). Estas paradas deberían adaptarse al cambio climático antes que otras, según criterio expresado por los organismos financiadores.

➔ Paradas que se encuentran involucradas en proyectos planificados o ya licitados por el MOP, pero que aún no han sido ejecutados. La existencia de estos proyectos crea una clara oportunidad de introducir mejoras y complementos a las obras inicialmente previstas, con criterios de adaptación al cambio climático. Éstas pueden ser sistemas de drenaje y reducción de inundaciones, o

bien actuaciones en superficie que mejoren las condiciones locales de sombra y humedad.

El nivel de prioridad asignado a cada parada se ha establecido a partir de los siguientes criterios empíricos, que combinan factores de peligrosidad en la situación actual y con cambio climático:

- **Prioridad alta:** inundaciones frecuentes (5 años de periodo de retorno) con clima actual, con calados superiores a 0.5 m.
- **Prioridad media:** inundaciones frecuentes (5 años de periodo de retorno) con clima futuro, con calados superiores a 0.5 m.
- **Prioridad baja:** inundaciones con calados superiores a 0.5 m para 100 años de periodo de retorno con clima actual y/o para 100 años de periodo de retorno, con clima futuro.

De este modo, se ha obtenido la siguiente selección de paradas dividida en cuatro grupos (según si pertenecen o no a los patios Chorrillo y Curundú y si tienen o no proyecto MOP) con su respectivo nivel de prioridad (Cuadros 13-15).



Cuadro 12

Paradas con riesgo potencial de inundación pertenecientes a las líneas de los patios Chorrillo y Curundú no incluidas en proyectos MOP

ID	Código	Parada	Prioridad
1	I0975-1	Calle 89 C Este-R	Baja
2	EINCC3A	Edificio Inteligente	Baja
3	COEST1A	Entrada Costa del Este-I	Baja
4	COEST2A	Entrada Costa del Este-R	Baja
5	ERMVH3A	Esc. Ricardo Miro	Baja
6	GSICC3A	Grupo Silaba	Media
7	HCOCS1A	Happy Copy CE-I	Baja
8	KIEOC3A	Kiener-I	Media
9	MEDOT1A	MEDUCA-I	Media
10	MOPCE1A	MOP-I	Baja
11	C1105-1	MOP-R	Baja
12	M0992-1	Parque Metropolitano	Media
13	ALBRO4A	Puente Albrook-Control	Baja
14	SAMCS1A	Sta Maria-I	Media
15	TECCE2A	Tecnasa-R	Baja
16	UDECL3A	UDELAS-I	Baja
17	C1069-1	UDELAS-R	Baja
18	C035016	Zona Paga 5 de Mayo - Puerta 16	Media

Fuente: elaboración propia, 2023

Cuadro 13

Paradas con riesgo potencial de inundación pertenecientes a las líneas de los patios Chorrillo y Curundú incluidas en proyectos MOP

ID	Código	Parada	Prioridad
1	C1324-1	ANA	Baja
2	ASEVE4A	ASEP-Control	Baja
3	YMCBL3A	Calle Arnulfo Arias	Media
4	CARVE2A	Carrasquilla-R	Baja
5	JCOAN1A	Junta Comunal de Ancon-I	Baja
6	C1025-1	Metro Albrook	Baja
7	MULTI1A	Multipiazza-I	Alta
8	PNACE1A	Policia Nacional-I	Baja
9	VIAVB3A	Vía Brasil	Alta

Fuente: elaboración propia, 2023



Cuadro 14 Paradas con riesgo potencial de inundación pertenecientes a las líneas de los patios Chorrillo y Curundú incluidas en proyectos MOP

ID	Código	Parada	Prioridad
1	ABICP2A	Agua Bendita Interna-R	Media
2	BOTVR2A	Biblioteca Omar Torrijos-R	Baja
3	BPJTK1A	Buen Paisaje- I	Baja
4	100VL3A	Calle 100 Oeste	Baja
5	C23VR3A	Calle 23	Baja
6	E2326-1	Calle A Las Begonias	Baja
7	C10SL1A	Calle C 10-I	Baja
8	E2328-1	Calle de las Margaritas	Baja
9	E2324-1	Calle del Cedro	Baja
10	E0997-1	Calle La Cordillera	Baja
11	CVITM1A	Cerro Viento-I	Baja
12	CHBTK1A	Chilibrillo-I	Baja
13	CLANT1A	Clayton-I-Control	Media
14	CLANT2A	Clayton-R-Control	Alta
15	CPRAD1A	Colonias del Prado-I	Baja
16	CPRAD2A	Colonias del Prado-R	Baja
17	E1194-1	Diego de Almagro	Baja
18	SUCCP2A	El Sucre-R	Baja
19	E1175-1	Entrada Corredor Sur	Baja
20	GACHA1A	Garita Chanis-I-Control	Media
21	GAMET1A	Garita Metropark A	Baja
22	GAMET2A	Garita Metropark B	Baja
23	N2360-1	Interna Villa Zaita-I	Baja
24	LLBCS1A	Llano Bonito-I-Control	Media
25	LLBCS2A	Llano Bonito-R-Control	Media
26	CAODB1A	Los Caobos-I	Baja
27	CAODB2A	Los Caobos-R	Media
28	PUEBL2A	Los Pueblos-I	Baja
29	PUEBL4A	Los Pueblos-R	Baja
30	SAUDB1A	Los Sauces-I	Baja
31	MROVR2A	Materiales Rodriguez-R	Alta
32	E2322-1	Parque San Antonio	Baja
33	E2339-1	Parroquia de Villa Lucre	Media
34	E2305-1	PH Peninsula-R	Media
35	AGOVL3A	Plaza Agora	Media
36	E2270-1	Plaza La Condesa	Baja



ID	Código	Parada	Prioridad
37	E1418-1	Policia Ciudad Radial-I	Media
38	E1173-1	Policia Ciudad Radial-R	Baja
39	E0745-1	Rotonda Ciudad Radial	Baja
40	SCOV2A	Salida Calle O-R	Media
41	E1420-1	Salida Corredor Sur	Baja
42	SALIDLA	Salida Los Andes	Media
43	TOPVL3A	Top Aire	Baja
44	TMOTM1A	Torremolino-I	Baja
45	TROTK2A	Tropigas-R	Baja
46	C035001	Zona Paga 5 de Mayo - Puerta 01	Media
47	ZPALP11	ZP Metro Cerro Viento-I - Puerta 1	Media
48	ZPALP12	ZP Metro Cerro Viento-I - Puerta 2	Media
49	ZPALP21	ZP Metro Cerro Viento-R - Puerta 1	Media
50	ZPALP22	ZP Metro Cerro Viento-R - Puerta 2	Media
51	ZPALP23	ZP Metro Cerro Viento-R - Puerta 3	Media

Fuente: elaboración propia, 2023

Cuadro 15 Paradas con riesgo potencial de inundación no pertenecientes a las líneas de los patios Chorrillo y Curundú incluidas en proyectos MOP

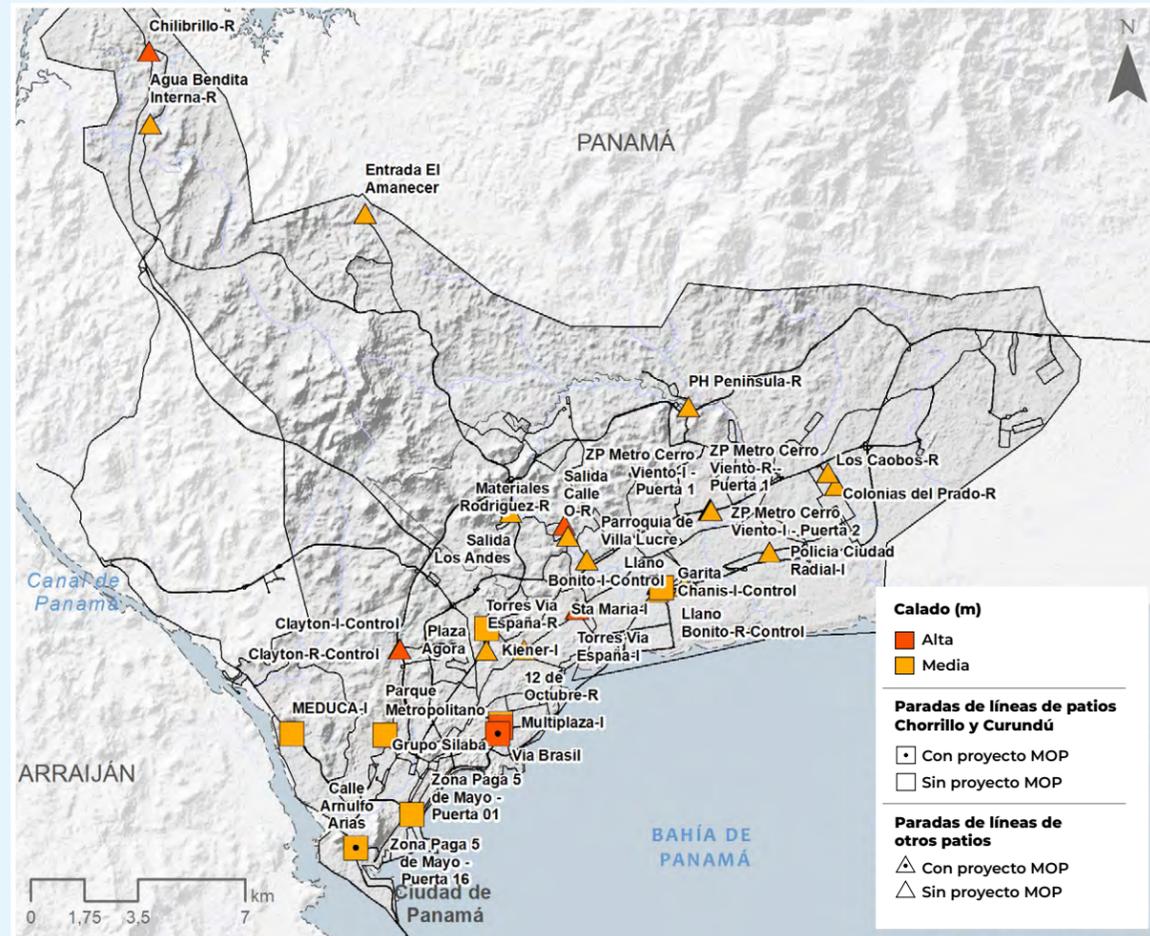
ID	Código	Parada	Prioridad
1	OCTVE2A	12 de Octubre-R	Media
2	E1180-1	Bomberos de Juan Diaz-I	Baja
3	CAETO2A	Calle Aeropuerto-R	Media
4	E1522-1	El Milagro-I	Baja
5	ELEVE2A	Parque Lefevre 75	Baja
6	PCAVE1A	Plaza Carolina-I	Baja
7	PCAVE2A	Plaza Carolina-R	Baja
8	TERCB1A	Santa Teresa-I	Baja
9	TESVE1A	Torres Via España-I	Alta
10	TESVE2A	Torres Via España-R	Alta
11	VINTK1A	Villa Nueva-I	Baja
12	OCTVE2A	12 de Octubre-R	Media
13	E1180-1	Bomberos de Juan Diaz-I	Baja
14	CAETO2A	Calle Aeropuerto-R	Media
15	E1522-1	El Milagro-I	Baja
16	ELEVE2A	Parque Lefevre 75	Baja
17	PCAVE1A	Plaza Carolina-I	Baja
18	PCAVE2A	Plaza Carolina-R	Baja

Fuente: elaboración propia, 2023



En las siguientes figuras (27-29) se muestra la localización de las paradas afectadas diferenciadas según los cuatro grupos anteriores y únicamente para la prioridad media y alta.

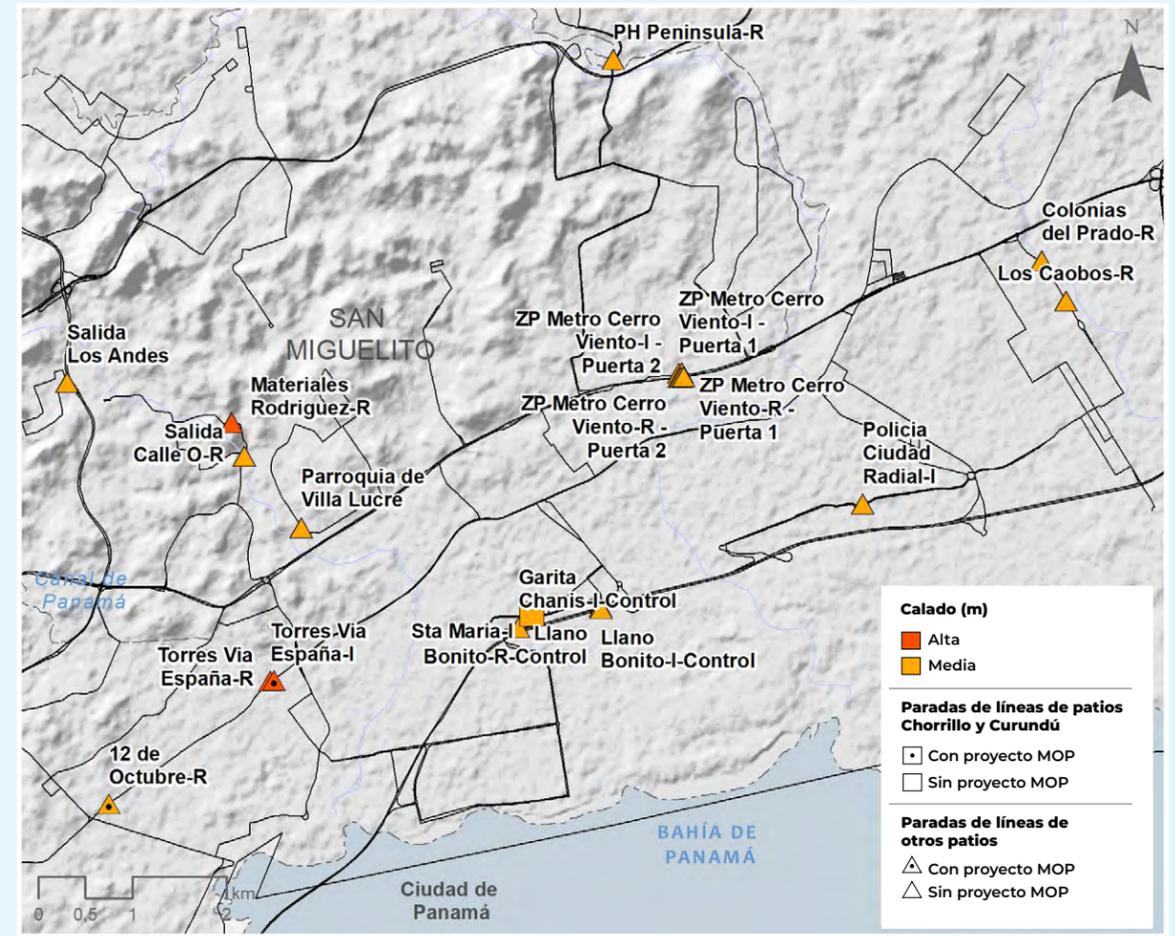
Figura 27 Paradas afectadas por orden de prioridad



Fuente: elaboración propia, 2023



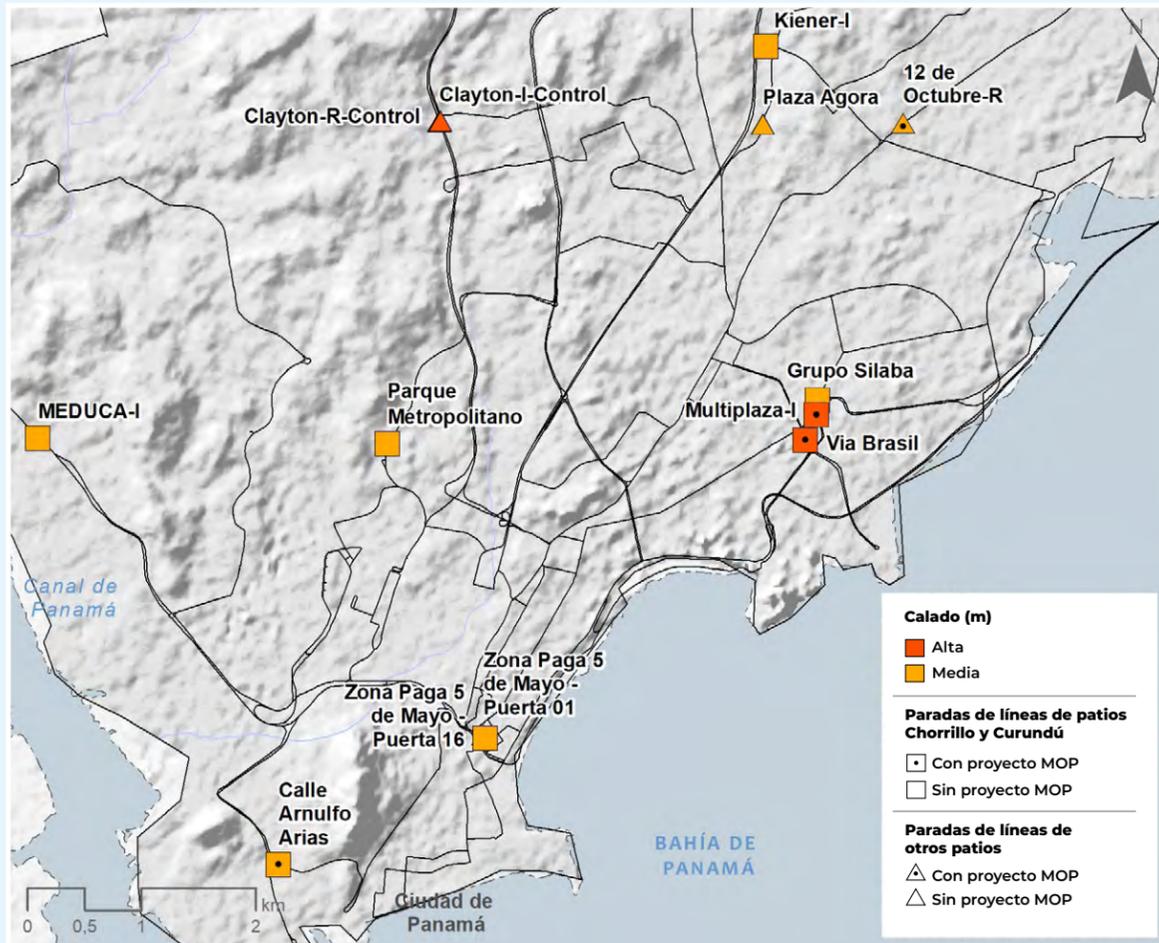
Figura 28 Paradas afectadas por orden de prioridad de la zona este de la ciudad de Panamá



Fuente: elaboración propia, 2023



Figura 29 Paradas afectadas por orden de prioridad de la zona oeste de la ciudad de Panamá



Fuente: elaboración propia, 2023



7.

CONCLUSIONES





Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

Este estudio hace una contribución necesaria para el entendimiento del riesgo de desastres y cambio climático por inundación y olas de calor en Ciudad de Panamá, con un foco en el sistema de transporte público. El estudio abarcó la evaluación de la amenaza por olas de calor y, para el caso de la inundación, la amenaza y riesgo obteniendo como resultado los mapas de las manchas de inundación y profundidades tanto para el escenario histórico como para el escenario con cambio climático. Aunque el alcance de este estudio se limita a la estimación del riesgo y no incluye el diseño de intervenciones específicas, los resultados aportan a entidades como el MOP, la Alcaldía de Panamá y MiBus en la identificación, planificación e implementación de medidas de adaptación que hagan más verde y resiliente la infraestructura urbana y de transporte.

La metodología de evaluación cuantitativa de riesgos de desastres y cambio climático debe ser robusta y nos pone frente a retos en cuanto a la escasez de datos instrumentales (temperatura, humedad, etc.) y cuándo usar estimaciones a nivel regional o local de estos para caracterizar la amenaza. Esta falta de información lleva a que los modelos, como las curvas IDF, requieran integrar supuestos. Sin embargo, un estudio como este permite la identificación de estas deficiencias y brechas de información; y por tanto, es una oportunidad para mejorar los sistemas de información de los países, ciudades y localidades para recolectar

datos y así tener resultados más robustos en futuras modelaciones.

La evaluación e implementación de las medidas de reducción del riesgo debe ser una labor coordinada que diferentes instituciones son las encargadas de las intervenciones puntuales en los componentes del sistema. El reto que impone el cambio climático trae oportunidades para trabajar mancomunadamente por medio de una coordinación interinstitucional e intersectorial, en las que cada entidad aporte para aumentar la resiliencia de la ciudad. En esa misma línea, se recomienda complementar



las medidas estructurales de reducción de riesgo con intervenciones en el marco social, y actualizaciones en el marco institucional y normativo, garantizando así la atenuación del riesgo en la zona y la neutralización del mecanismo que lo ha generado. Asimismo, se recomienda actualizar la normativa y manuales de diseño para integrar en los proyectos tanto el cambio climático, como habilitar la posibilidad de implementar soluciones innovadoras.

El alcance de este reporte no incluye proponer medidas específicas. No obstante, medidas que pueden implementarse en Ciudad de Panamá para mitigar el riesgo de inundación y de ola de calor, y que han sido implementadas satisfactoriamente en otros lugares, incluyen redimensionamiento de las obras convencionales para tener en cuenta el cambio climático, zanjas filtrantes y cunetas verdes, pavimentos porosos, áreas de bioretención y

techos verdes, jardines de lluvia y elementos de almacenamiento de agua, mejoras en arquitectura y urbanismo bioclimáticos incluyendo arborización.

Para próximos estudios se sugiere considerar escenarios de crecimiento urbano y de la expansión del sistema de transporte público, por ello es necesario actualizar la información del Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable (PIMUS) para el AMCP; profundizar en las características de los elementos expuestos y los factores de vulnerabilidad de cada mecanismo de daño; revisar las curvas IDF para periodos de retorno inferiores a 1 hora para evitar sobredimensionamiento de los sistemas de drenaje, ya que por la impermeabilización del suelo urbano la mayoría de los drenajes cae por debajo de este rango donde en las curvas IDF tradicionales no tienen datos y son asintóticas.

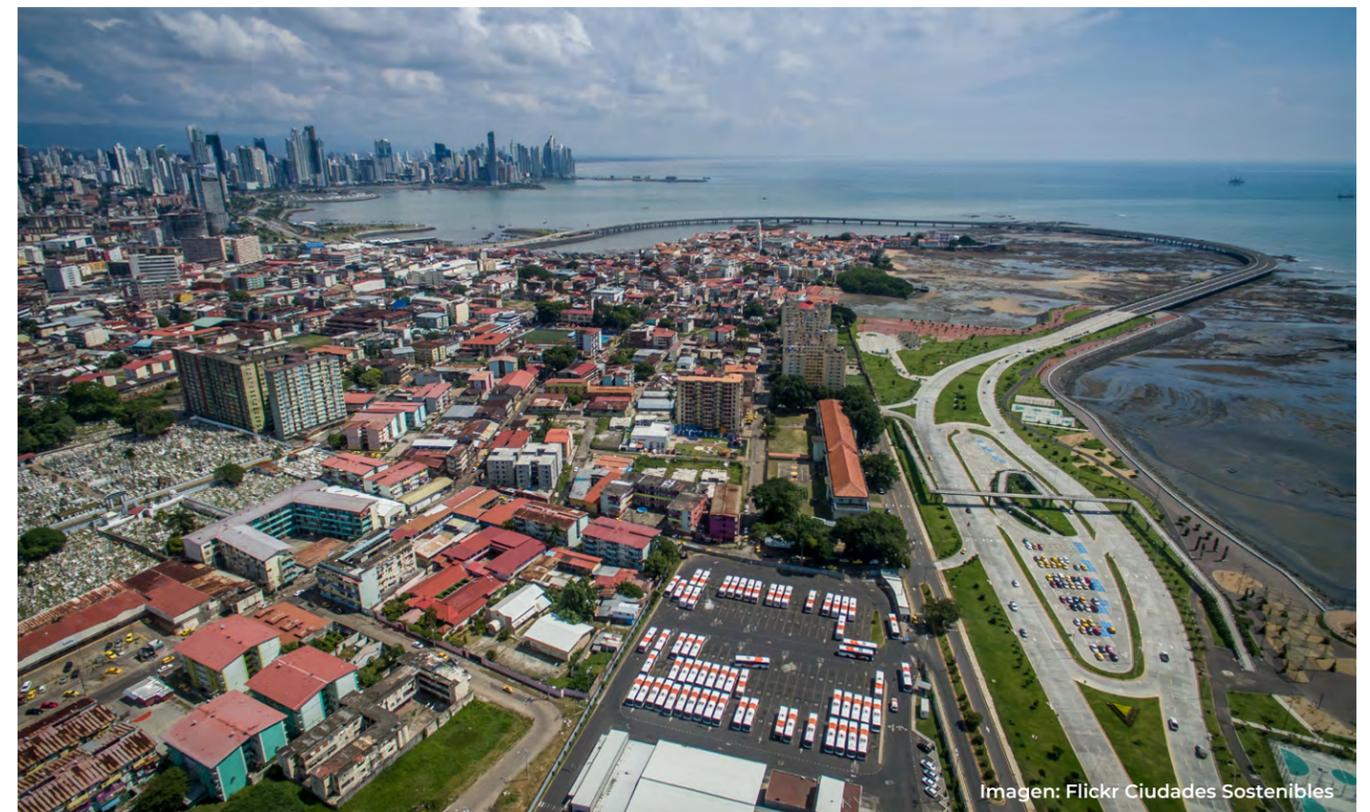


Imagen: Flickr Ciudades Sostenibles

REFERENCIAS

- Alcaldía de Panamá. (2016). Plan Integral para la mejora de la Movilidad y Seguridad Vial para el Centro Histórico de la ciudad de Panamá. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Alcaldía de Panamá. (2018). *Panamá Resiliente*. Alcaldía de Panamá.
- Barandiarán, M., Esquivel, M., Lacambra, S., Suárez, G., & Zuloaga, D. (2019). *Resumen ejecutivo de la Metodología de Evaluación del Riesgo de Desastres y Cambio Climático: Documento técnico de referencia para equipos a cargo de proyectos del BID* (IDB-TN-01583). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Baskin, A. (2023). *Nature Based Solutions (NBS) in the Transport Sector*.
- BID. (2016). *Guía Metodológica Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles* (III). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Eichhorst, U., Bongardt, D., & Miramontes, M. (2011). Climate-Proof Urban Transport Planning: Opportunities and Challenges in Developing Cities. In K. Otto-Zimmermann (Ed.), *Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change Proceedings of the Global Forum 2010* (pp. 91–105). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0785-6_9
- Farías, L. (2012). *El transporte público urbano bajo en carbono en América Latina: Innovación ambiental de servicios urbanos y de infraestructura: Hacia una economía baja en carbono* (LC/W.469). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- García, E., Ginés Suárez, , Esquivel, M., Ruiz, A., Zuloaga, D., & Chevalier, O. (2019). *Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidroclimáticos en ciudades: lecciones aprendidas de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles ante el reto del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe*. <http://www.labd.org>
- Hagen, I., Huggel, C., Ramajo, L., Chacón, N., Ometto, J. P., Postigo, J. C., & Castellanos, E. J. (2022). Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21st century. In *Environmental Research Letters* (Vol. 17, Issue 3). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5271>
- INEC. (2023). *Resultados Finales Básicos XII Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda 2023*.
- IPCC. (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)].
- IPCC. (2022b). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)].
- IPCC. (2023). *Section 2: Current Status and Trends. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Úrge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Navarrete, J., Caimanque, R., Sáenz, L., Larraín, I., & Irazábal, C. (2020). *Patrimonio Vivo: Documento de enfoque*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- NWS. (2024). *What is the heat index?* Information. <https://www.weather.gov/ama/heatindex>
- P.A. Arias, N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, ... K. Zickfeld. (2021). Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Adams, H., Adelekan, I., Adler, C., Adrian, R., Aldunce, P., Ali, E., Ara Begum, R., Bednarfiedl, B., Bezner Kerr, R., Biesbroek, R., Birkmann, J., Bowen, K., Caretta, M. A., Carnicer, J., Castellanos, E., Cheong, T. S., Chow, W., ... Zaiton Ibrahim, Z. (2022). Technical Summary. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>
- Rodríguez, D. A., Vergel-Tovar, C. E., & Gakenheimer, R. (2018). Desarrollo urbano orientado hacia buses rápidos: Lecciones y perspectivas de planificación con base en tres ciudades colombianas. *Transporte y Desarrollo En América Latina*, 1(1), 75–91.
- Sánchez Rodríguez, R. (2013). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina* (LC/W.563). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Scorcia, H. (2018). Retos y oportunidades para el financiamiento de la operación del transporte público en Ciudad de Panamá. *Transporte y Desarrollo En América Latina*, 1(1), 31–52.
- UNDRR. (2022a). *Principles for RESILIENT INFRASTRUCTURE*.
- UNDRR. (2022b). UNDRR Strategic Framework. In *UN Office for Disaster Risk Reduction*.
- UNDRR. (2024, February 16). What is the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction? Implementing the Sendai Framework. <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework>
- Vasconcellos, E. A., & Mendonça, A. (2016). *Observatorio de Movilidad Urbana: Informe 2015-2016 (resumen ejecutivo)*.
- Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Clarke, G., & Ge, Y. E. (2020). Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102553>
- WMO. (2015). *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development*.

