



Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2023

Investigación

Diseño del índice de exposición a la amenaza natural de inundaciones: el caso de exposición de edificaciones

Investigadores:

Vladimir González Gamboa

Rudy Muñoz Jiménez

Christian Vargas Bolaños

Diana Köpper Álvarez

San José | 2023



363.34
D611d

Diseño del índice de exposición a la amenaza natural de inundaciones: el caso de exposición de edificaciones / Vladimir González Gamboa. [et al.]. -- Datos electrónicos (1 archivo : 2.950 kb). -- San José, C.R. : CONARE - PEN, 2023.

ISBN 978-9930-618-81-3

Formato PDF, 34 páginas.

Investigación para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2023.

1. INUNDACIONES. 2. DESASTRES NATURALES. 3. EDIFICIOS. 4. PREVENCIÓN. 5. COSTA RICA. I. González Gamboa, Vladimir. II. Muñoz Jiménez, Rudy. III. Vargas Bolaños, Christian. IV. Köpper Álvarez, Diana. V. Título.



Contenido

Descargo de responsabilidad	4
Introducción.....	4
Objetivos	9
Metodología	9
Antecedentes.....	9
Detalles metodológicos.....	10
Limitaciones.....	15
Resultados	16
Áreas urbanas y edificaciones: 1986, 1996, 2006, 2014, 2017	16
Índice Exposición Directa a Inundaciones (IEDI).....	22
Impacto en poblaciones locales	25
El caso de Filadelfia (Guanacaste)	26
El caso de Puerto Viejo de Sarapiquí (Heredia).....	27
Cuantificación de posibles pérdidas económicas en edificaciones.....	28
Conclusiones.....	31
Bibliografía	32

Descargo de responsabilidad

Esta Investigación se realizó para el *Informe Estado de la Nación 2023*. El contenido de la ponencia es responsabilidad exclusiva de su autor, y las cifras pueden no coincidir con las consignadas en el *Informe Estado de la Nación 2023* en el capítulo respectivo, debido a revisiones posteriores. En caso de encontrarse diferencia entre ambas fuentes, prevalecen las publicadas en el Informe.

Aplicación de formato: Karol Arroyo Monge.

Introducción

Los eventos hidrometeorológicos extremos son uno de los más peligrosos en el mundo, además pueden causar grandes pérdidas económicas (Quesada-Román, 2022). A nivel mundial se estima que solo en el 2016 estos costos ascendieron a US\$ 60 billones (Aerts et al. 2018; Quesada-Román, 2022). Sin embargo, los costos pueden ascender más allá de los meramente tangibles económicamente, cuando un evento hidrometeorológico extremo afecta una zona determinada, la población y el comportamiento humano en sí se ve afectado. Por lo que, el evento en sí puede mediar el tiempo de recuperación de la población y su capacidad de readaptarse nuevamente con sus vidas (Aerts et al., 2018).

Según Bello et al. (2020), entre 1970 y 2019 América Latina y el Caribe se vio impactada por 2.309 desastres causando 510.204 muertes, 297 millones de habitantes afectados y se perdieron alrededor de US\$ 437.000 millones. En el caso de Centroamérica y México, el 34% de estos desastres fueron inundaciones, ubicándose como el evento extremo más frecuente en la región. En el istmo centroamericano, las inundaciones han causado impacto en términos de desarrollo humano, como ejemplo se tiene el alto impacto causado por el huracán Mitch en 1998 (Salgado, 2009).

En Costa Rica alrededor del 59,4% de los eventos extremos corresponde a inundaciones, por ejemplo, entre 2002 y 2012 se registraron 5.614 eventos de inundación, que lamentablemente terminaron con la vida de 30 personas, tres personas desaparecidas y 11 personas con afectación a la salud. En términos de infraestructura se estima que 30.964 viviendas resultaron afectadas (Cubero y Carvajal, 2014). Los impactos son diversos, los que usualmente se cuantifican son las pérdidas en agricultura, salud e infraestructura. Se estima que a inicios de la década del 2000 los daños por este tipo de eventos ascendían al 0,32% del PIB nacional, y hasta un 1,07% del PIB agrícola (Cubero y Carvajal, 2014). En Costa Rica, aún falta profundizar en afectaciones adicionales que pueden generar las inundaciones, por ejemplo, las consecuencias sanitarias que muchas veces se manifiestan hasta días después de pasado el evento (Cubero y Carvajal, 2014).

Brenes (2016) y PEN (2016), detallan que en el periodo 1985 y 2015 el país sufrió diversos eventos, los más importantes fueron inundaciones, lluvias y tempestad con 8057 eventos, y deslizamientos con 3437. En el 2015, dos fenómenos atmosféricos causaron inundaciones y deslizamientos, principalmente se vieron afectados cantones de la provincia de Limón: Limón, Pococí, Siquirres, Talamanca, matina y Guácimo; en la provincia de Heredia se vio afectado Sarapiquí, y Turrialba en la provincia de Cartago. En ese año la CNE invirtió labores de primer impacto cerca de ₡10.378.241.387,09 (circa 10 mil trescientos millones de colones). Adicionalmente, la CNE reportó por pérdidas o costo de reposición un total de

¢91.016.579.007,75 (circa 91 mil millones de colones. De estas pérdidas, la mayoría se concentra en infraestructura vial, puentes y alcantarillado) (Brenes, 2016; PEN (2016).

De acuerdo con Quesada-Román (2022), en Costa Rica, los cantones más expuestos son aquellos ubicados en llanuras y zonas costeras, lo que también es afirmado por Arroyo (2009). Por otro lado, Arroyo (2009) resalta la permisividad de la construcción en zonas marginales y poco seguras, por ejemplo, en los márgenes fluviales, lo que termina causando que el riesgo de verse afectado por inundaciones se incrementa. Lo anterior es manifiesto en muchas zonas urbanas de Costa Rica. El PEN (2020) ejemplifica bien lo mencionado usando datos de construcciones registradas por el Colegio federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA), se estima que el 28% de toda el área construida en el país entre 2016 y 2019 se localizó en cantones con condiciones menos favorables para desarrollar en forma sostenible la actividad inmobiliaria. Lo que es aún más preocupante, es que el 78% las construcciones registradas no están dentro de algún plan de ordenamiento territorial.

Existe un elemento ligado al crecimiento urbano, y es el crecimiento de la población, de acuerdo con Sánchez et al. (2018) y PEN (2018) la población en el Gran Área Metropolitana (GAM) ha venido en aumento, y se proyecta que así continúe. Sin embargo, si se mira a nivel distrital, algunos distritos ganarán población, como el caso de Pavas, mientras que otros perderán población, como es el caso de San Francisco de Dos Ríos. Por otro lado, la mancha urbana asociada a la GAM entre 1986 y el 2018 ha crecido año con año, pero a tasas más reducidas en los años más recientes. Esto ha sucedido por el agotamiento de terrenos, aumento de construcciones verticales, lo que ha compactado más la densidad poblacional (Sánchez et al., 2018, PEN, 2018).

Ahora bien, este crecimiento señalado como se ha dado en términos de que eventos climáticos puedan afectar a la población. De acuerdo con Salgado (2009), precisa que la Gran Área Metropolitana (GAM), ha crecido sin planificación alguna, por ende, los impactos hidrometeorológicos persistirán. Entre los principales problemas por resolver están la recuperación física y ambiental de microcuencas, lo que en sí mismo es un reto de gestión, ya que diferentes municipalidades convergen en su manejo (Salgado, 2009). Sobre esto el PEN (2020) detalla que entre el 2010 y el 2019, cerca del 38,2% de todas las construcciones se localizó en cantones con alta frecuencia de desastres por eventos naturales. En forma más específica, en el caso de la localización en zonas clasificadas como de alto riesgo de inundación, se identificaron 12.049 construcciones, esto para el periodo 2016-2019.

Este crecimiento urbano, en definitiva, no ha sido planificado, así lo detalla Sánchez (2021) y PEN (2021), en el país, el 60% de los cantones no cuenta con viabilidad ambiental dentro de la planificación de su territorio. Si tomamos en cuenta el caso de las ciudades intermedias, solo Turrialba no tiene plan regulador, y solo 2 de 6 distritos que tienen plan regulador, cuentan a la vez con viabilidad ambiental. Lo preocupante es que los 6 distritos que albergan ciudades intermedias poseen planes muy antiguos que están entre los 15 y los 24 años de creados. En términos generales, un 33% de la población habitan en cantones sin planes reguladores.

Fuera de la GAM, los cambios del uso de la tierra, deforestación en las partes medias y altas de las cuencas, desarrollos urbanísticos en zonas frágiles, aumentan los posibles impactos a

eventos hidrometeorológicos. Lo que en la práctica se podría determinar cómo en la falta de un manejo integral de las cuencas (Salgado, 2009). Siguiendo a Salgado (2009), los riesgos manifiestos a eventos hidrometeorológicos se caracterizan por: i. Remoción de masas (remoción de laderas, roca y suelo de subcuencas y microcuencas), ii. Áreas urbanas aglomeradas y con deterioro físico que causan inundaciones locales. Este último punto se asocia a un sistema inadecuado de alcantarillado, impermeabilización de suelos, y un inadecuado manejo de aguas y desechos sólidos.

Según Bello et al. (2020), para garantizar sociedades más resilientes a eventos climáticos extremos, es necesario no solo identificar el riesgo a desastres, sino también, diseñar y aplicar medidas que mejoren la infraestructura, se planifique el uso de la tierra, y se proteja financieramente a las personas. En Costa Rica la Ley 8488 define la gestión del riesgo como un proceso que lleva a revertir la vulnerabilidad a amenazas. Este modelo incorpora determinantes como la prevención y mitigación a eventos extremos.

Ahora, la presente investigación se centra en la exposición a inundaciones, de acuerdo con el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC), la exposición se define como la presencia de personas, bienes y servicios ambientales, infraestructura, física, social y cultura en lugares que pudieran ser afectados de manera negativa (IPCC, 2012). Esta definición, es la que se usará en el presente trabajo.

Si bien la presente investigación no medirá ni tratará el tema del riesgo en forma directa, si es conveniente definirlo con el propósito de dar un contexto adecuado. Teóricamente, el riesgo, se estima como una relación multiplicativa del peligro, propio del fenómeno natural, con las condiciones de vulnerabilidad: $Riesgo = Peligro * Vulnerabilidad$ (Cubero y Carvajal, 2014).

Según la Ley 8488 el riesgo se definiría como una probabilidad a que se concreten pérdidas en los factores económicos, ambientales, políticos, sociales y culturales (CNE, 2014). El riesgo equivale a: $Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad$. Existen varios tipos o niveles de riesgo, a) riesgo actual: rápidamente materializable en un desastre, b) riesgo futuro: se concreta por las tendencias en la mala gestión, c) riesgo residual: riesgo remanente, incertidumbre de la gestión, d) riesgo aceptado: resultante de la combinación de factores económicos, ambientales, políticos, sociales y culturales con escenarios complejos de ser mitigados, y d) riesgo aceptable: nivel de pérdida tolerable para una sociedad (CNE, 2014).

La amenaza se entiende como la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno peligroso, ya sea natural o provocado por el ser humano, que puede generar daños diversos a la sociedad. Por otro lado, la vulnerabilidad se define como una condición inherente a ser impactado por un fenómeno (CNE, 2014). Esta definición de vulnerabilidad es algo más compleja que la encontrada en otros trabajos. Según esta definición la vulnerabilidad estaría en función de la exposición, la fragilidad social y la nula o débil resiliencia. En esta intervienen factores ambientales, físicos, económicos y sociales (CNE, 2014). En este punto es conveniente presentar el objetivo del trabajo, aquí se desea ubicar en el espacio las edificaciones que estén expuestas a inundaciones ya sea en menor o mayor grado. Este es el único componente de la vulnerabilidad que se abordará, se escapa del objetivo de estudio incluir aspectos socioeconómicos u alguna otra dimensión. De igual manera, en este trabajo no será medida ni se analizará en forma directa la amenaza. El único elemento que este estudio utilizará para delimitar la amenaza es la geolocalización espacial que la CNE hace para identificar zonas potencialmente inundables.

Existen diversos trabajos que abordan la exposición, sin embargo, no lo hacen en forma única, sino que lo hacen como parte de identificar y analizar el riesgo. A pesar de que el presente estudio no se enfoca en riesgo, si es conveniente la revisión de varios estudios para presentar como es que es usada la exposición en este contexto.

Oyedele et al. (2022), desarrollaron un índice de vulnerabilidad a inundaciones para priorizar la atención a comunidades en Nigeria. Dentro de este índice se incluyó la exposición como un componente de la vulnerabilidad. Esta variable fue creada mediante un constructo agregado que toma en cuenta la elevación del terreno, la cercanía de las fincas e infraestructura a los cuerpos de agua, la incidencia de crecida de los ríos, y el porcentaje de las fincas que son usualmente inundables.

Quesada-Román (2022) estudia el riesgo a inundaciones en Costa Rica, el autor propone el uso de los tres factores clave al estudiar el riesgo a inundaciones: a) el peligro, b) la exposición y c) la vulnerabilidad. Las variables que el peligro toma en cuenta son la cercanía a zonas inundables o propensas a inundarse, la pendiente, y la intensidad y duración de las lluvias. Por otro lado, la exposición estima y cuantifica la densidad de población, el promedio de la red vial y el porcentaje del municipio que no posee cobertura forestal. Este autor encontró que tanto el Pacífico Norte como el Caribe Norte son las zonas más expuestas a inundaciones del país. Además, nueve de 24 cantones con alta exposición están dentro de la GAM, por ejemplo, Belén, San Pablo, Curridabat, San José, Santo Domingo, Tibás, Grecia y Montes de Oca. En esencia, cantones con mayor área deforestada, mayor densidad de la red vial y mayor densidad poblacional estarían más expuestos a inundaciones (Quesada-Román, 2022).

Otro abordaje, que se basa en un índice de riesgo a inundaciones es el usado por Okazawa et al. (2011), los autores desarrollan un índice de riesgo global basado en factores biofísicos y socio-económicos. Basándose en datos del promedio mensual de precipitación y utilizando técnicas de regresión, los autores generan un modelo que permite predecir futuros daños por inundaciones. La acumulación de precipitación en el tiempo permite estimar futuros daños con datos de eventos históricos. En este caso, la vulnerabilidad incorporó variables asociadas a la economía, salud, cobertura del suelo, población, ríos y vegetación. Aunque el trabajo no hace referencia a la exposición en forma directa como subcategoría de la vulnerabilidad, este sí incorpora variables que hacen referencia a la exposición, por ejemplo, el porcentaje de área agrícola y la elevación del terreno.

Por otro lado, Hernández-Uribe et al. (2017) analizan el riesgo por inundación mediante una metodología con dos ejes complementarios, primero un enfoque determinista, basado en modelación numérica y determinación de daños. En segunda instancia, el enfoque paramétrico, que homologa los factores que modelan la vulnerabilidad, para esto se desarrollan índices adimensionales normalizados por los componentes: social, económico, físico y ambiental. Los resultados muestran las zonas de riesgo y de alta vulnerabilidad por tramos del río Atemajac en México. La vulnerabilidad fue medida a través de la exposición, la susceptibilidad y la resiliencia. En este caso, la exposición incluye la elevación del terreno, la longitud de escurrimiento, número de personas viviendo en el área de inundación, porcentaje del área urbanizada.

Otra manera de modelar el peligro a inundaciones es incorporando la incertidumbre, tal y como Neal et al. (2013) proponen. Debido a la convergencia de diferentes cauces de ríos la incertidumbre se incrementa y resulta difícil predecir el nivel del evento, que a la vez dificulta el

manejo al riesgo. Para reducir esta incertidumbre los autores proponen un modelo usando método Monte-Carlo que a su vez incorpora la dependencia espacial de los causes de los ríos. En este caso la exposición está fuertemente ligada a la distancia de los cuerpos de agua.

En otro estudio, Barrantes y Vargas (2010), proponen que se debe realizar una zonificación de zonas cercanas a cauces fluviales como forma efectiva de entender las amenazas por inundaciones. De esta manera, se pueden hacer proyecciones sobre posibles daños, que pueden incrementar con forme aumente la frecuencia del evento. Estos parámetros se deben incorporar en el ordenamiento territorial para reducir el riesgo en el futuro. Para implementar esta metodología, los autores proponen levantar las unidades geomorfológicas, aplicar entrevistas a los habitantes de las comunidades para aproximar la frecuencia de las inundaciones y establecer los periodos de retorno de las máximas inundaciones (con el método Gumbel). Adicionalmente, Barrantes y Vargas (2010) plantean hacer una evaluación de la vulnerabilidad física. Esta se hace mediante una sobreposición de la infraestructura vial y de edificaciones. La exposición en este caso incluye la red vial, edificaciones, y distancia a ríos y sus cauces.

Finalmente, este trabajo pretende especificar con alto detalle espacial las zonas más expuestas dentro de las áreas ya identificadas, por la CNE, con peligro de ser. Dentro de estas áreas inundables existen zonas que pueden ser priorizadas para mejorar aún más la gestión del riesgo, y mejorar la respuesta ante una emergencia. Por esta razón la exposición va a ser evaluada por la cercanía a ríos, para esto se crean áreas a diferentes distancias de los ríos, estas se llamarán zonas *buffer*, este variable fue usada por varios autores (Oyedele et al., 2022; Neal et al., 2013; Barrantes y Vargas, 2010). La segunda variable a ser usada en la priorización de la exposición fue la pendiente del terreno, esta fue usada también por diversos autores (Oyedele et al., 2022; Okazawa et al., 2011; Hernández-Uribe et al., 2017; Nawrotzki et al., 2023).

La vulnerabilidad, como tal, con todas sus dimensiones no será abarcada en forma directa en este trabajo, ya que el nivel de desagregación de la investigación demandaría datos a muy pequeña escala, y que en este momento no es posible tener para todo el país. Por otro lado, la amenaza o peligro, que se puede medir por la variable precipitación no se abarcará en este estudio, ya que el objetivo va dirigido a identificar la exposición. Sin embargo, a futuro si se pretende incluir esta variable en una ampliación de este estudio.

Finalmente, el objetivo es cuantificar las edificaciones más expuestas a inundaciones. En este caso el aporte adicional del trabajo será medir, entre 1986 y el año 2017, como ha evolucionado, espacialmente, el crecimiento de las edificaciones en el tiempo para las zonas que se identificarán como más o menos expuestas a inundaciones. Una vez realizado esto, se estimará el posible costo económico de reponer estas edificaciones, en caso de una eventual pérdida.

Estos aportes vienen a llenar un vacío de información, y que pretende aportar a la mejora de la atención de la población y edificaciones altamente expuestas a inundaciones. Gestión que se torna clave en lugares con poblaciones ya establecidas, y cuya reubicación es complicada por diversas razones socioeconómicas y culturales, tal y como Arroyo (2009) lo subraya.

Objetivos

Objetivo general

Identificar las zonas con mayor exposición a inundaciones en el período 1986-2017.

Objetivos específicos:

- Construir un índice de exposición directa a inundaciones, para zonas con potencial de inundación del país.
- Cuantificar las edificaciones expuestas a inundaciones para Costa Rica entre 1986 y 2017.
- Cuantificar económicamente el costo de una posible reposición de edificaciones ubicadas en zonas de alta exposición a inundaciones.

Metodología

Identificación de áreas urbanas y edificaciones: 1986, 1996, 2006, 2014, 2017.

Antecedentes

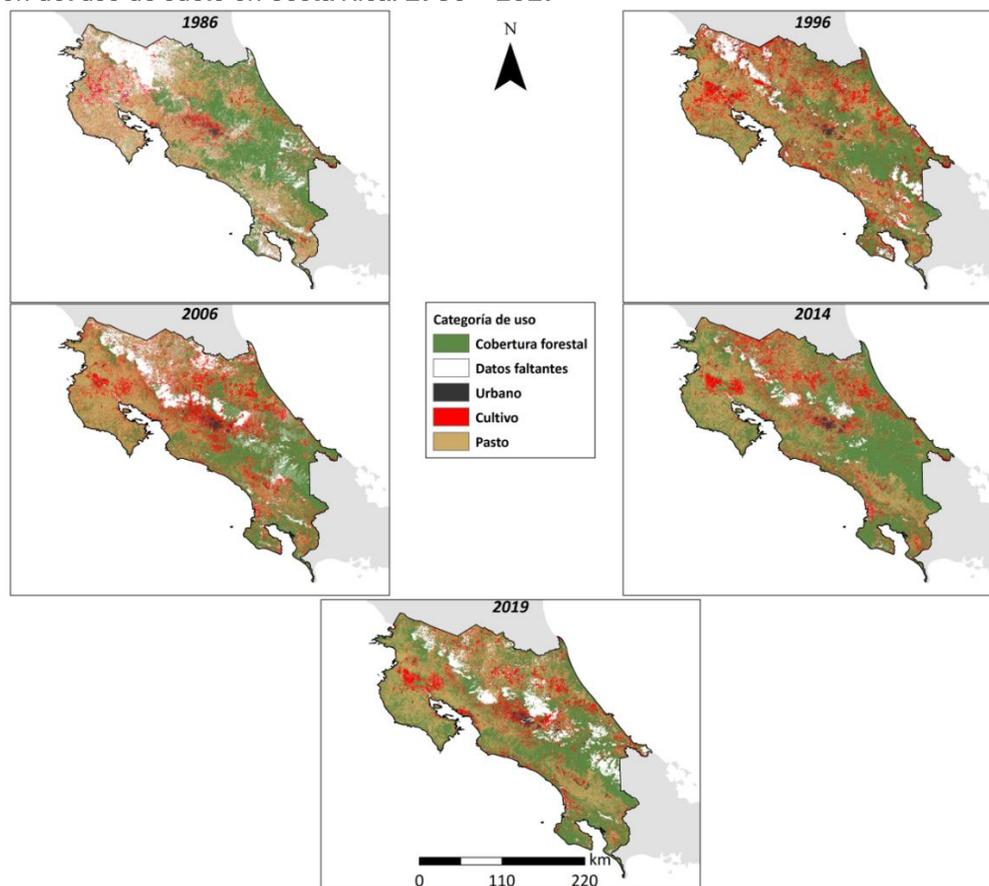
La primera etapa del presente análisis de uso urbano se desarrolló durante el año 2021 (González et al., 2021). En ella, se realizó una clasificación supervisada¹ de todo el territorio de Costa Rica para obtener una aproximación a la distribución de uso de suelo en el país, en los años 1986, 1996, 2006, 2014 y 2019. Los resultados de esta etapa fueron incluidos en la investigación de base para el *Informe Estado de la Nación 2021* titulada “Descripción de cambios de uso del suelo en Costa Rica: 1986-2019”. Los mapas 1 muestra la distribución espacial resultante de dicho proceso.

El resultado de la identificación de usos del suelo se concentró en cuatro macro categorías: urbano, cultivos, cobertura forestal y pastos, esto para los años ya mencionados, los mapas 1 muestra las cuatro categorías para cada año. Esto permitió estimar cambios de un año a otro y la interacción entre las cuatro categorías (González et al., 2021). El estudio concluyó que existen nuevos desafíos, por ejemplo, las ganancias de cobertura forestal de décadas previas se están poniendo en peligro, por cambios a pastos, a cultivos y al uso urbano. En este último caso, principalmente en áreas fuera de la GAM, ligado al auge de ciudades centrales en el desarrollo económico regional y local. En este contexto, la ausencia de planes reguladores, acentuado un cambio no planificado del uso agrícola, de pastos y urbano, lo que estaría creando presión sobre los recursos forestales y biológicos ligados a la cobertura forestal (González et al., 2021).

¹ Este método clasifica los píxeles de un archivo raster (en este caso un mosaico proveniente de imágenes satelitales, de los satélites Landsat de la NASA) en categorías preestablecidas, con base en la firma espectral de píxeles muestreados de manera manual para entrenar el algoritmo.

Mapas 1

Clasificación del uso de suelo en Costa Rica. 1986 – 2019



Fuente: González et al, 2021.

Detalles metodológicos

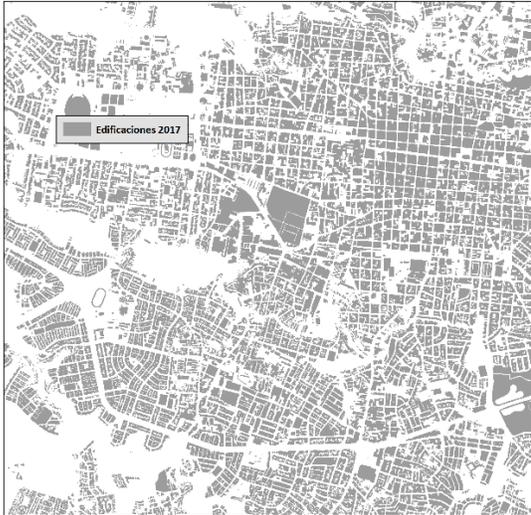
Con el objetivo de depurar la categoría “Urbano” resultante de la clasificación indicada anteriormente, se siguieron los siguientes pasos:

Se descargó el *shapefile Edificaciones 1:25.000* del nodo Instituto Geográfico Nacional (IGN) del SNIT. Este archivo fue generado a escala 1:25.000 en el año 2017, mediante métodos fotogramétricos digitales (IGN, 2022) y contiene estructuras o edificaciones pequeñas a nivel nacional. A manera de ejemplo, la imagen 2 muestra dos visualizaciones de esta capa georeferenciada.

La finalidad de este archivo es ser utilizado como base para la reconstrucción de uso urbano en los años 1986, 1996, 2006 y 2014; asumiendo que en dichos años no ha habido crecimiento urbano fuera de los polígonos definidos en el *shapefile Edificaciones 2017 1:25mil*. Por lo que el resultado de la clasificación supervisada de urbano se acota al área de edificaciones 2017, eliminando así posibles errores en sobre estimación de área urbana. Los mapas 2 muestra un ejemplo del uso de la capa mencionada.

Mapas 2

Visualizaciones de *shapefile* "Edificaciones 1:25mil"
Casco central de cantón San José



Pueblo Río Claro de cantón Golfito

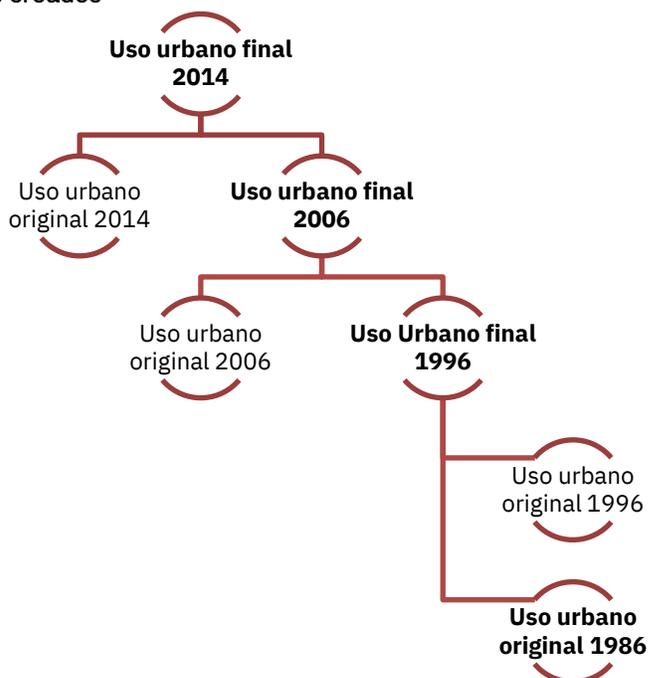


Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 y del IGN, 2022.

Las categorías "Urbano" de los años en estudio fueron separadas en archivos independientes. Posteriormente, se utilizó la herramienta "Merge"² para unir los distintos **shapefiles** de la siguiente manera:

² Esta herramienta, que pertenece al software ArcGis 10.8, une los polígonos de dos o más shapefiles en un archivo nuevo.

Diagrama 1
Archivos acumulados creados



Fuente: Elaboración propia.

Los archivos originales se refieren a los que fueron separados de la clasificación supervisada realizada por González et al. (2021) y descrita en el apartado “Antecedentes”, mientras que los archivos finales se refieren al acumulado de dos o más años anteriores. En otras palabras, se iba generando capas de uso urbano que se acumulaban en el tiempo. Por lo que el uso urbano de 2014 es el acumulado de cada capa desde 1986 hasta ese año, con lo lógico que las construcciones se van agregando en el tiempo.

El objetivo de este paso fue rellenar posibles datos faltantes, ya sea por nubosidad al momento de capturar la imagen satelital de un año en específico. De esta forma, la información de años anteriores se va acumulando, asumiendo que el uso urbano tiende a cambiar muy poco en el tiempo, y que su tendencia es a aumentar en vez de disminuir, como González et al. (2021) lo constatan.

Se aplicó la herramienta “*Intersect*”³ entre los *shapefiles* acumulados (marcados en negrita en el diagrama 1) y la capa de edificaciones. Al realizar este paso, se obtuvo la evolución del uso urbano dentro de los polígonos del archivo “Edificaciones 1:25mil”, por medio de los siguiente *shapefiles*:

- **Intersect_1986.**
- **Intersect_1996.**
- **Intersect_2006.**
- **Intersect_2014.**

³ Esta herramienta, que pertenece al software ArcGis 10.8, crea un archivo con las áreas de dos o más *shapefiles* que se superponen entre sí.

▪ Edificaciones_2017.

En otras palabras, el proceso consta en determinar y reproducir donde y cuando se fueron agregando o construyendo las edificaciones existentes en el 2017, basándonos en la identificación de uso urbano de la clasificación supervisada de González et al. (2021).

- Para determinar la fidelidad de los archivos generados, se utilizó la metodología propuesta por Chuvieco (2010) en “Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio”, la cual consta de una metodología para determinar la cantidad de puntos aleatorios que deben ser cotejados con el mosaico espacial original. Con base en el resultado de dicho cotejo, se calcularon los valores de exactitud total y error global.

La aplicación de la metodología de validación de resultados se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 1

Exactitud y error global de archivos generados

Condición	1986	1996	2006	2014
Exactitud global	93%	90%	97%	97%
Error global	7%	10%	3%	3%

Fuente: Elaboración propia con de González et al., 2021 y del IGN, 2022.

Para todos los archivos generados el resultado de exactitud global fue siempre mayor o igual a 90%. Un resultado mayor de 87% se considera como muy positivo y brinda una alta confiabilidad (Chuvieco, 2010). Por otro lado, los resultados fueron presentados y analizados con colaboradores del IGN, CNE, MINAE, PRIAS/CeNAT y PEN para recibir retroalimentación.

Limitaciones

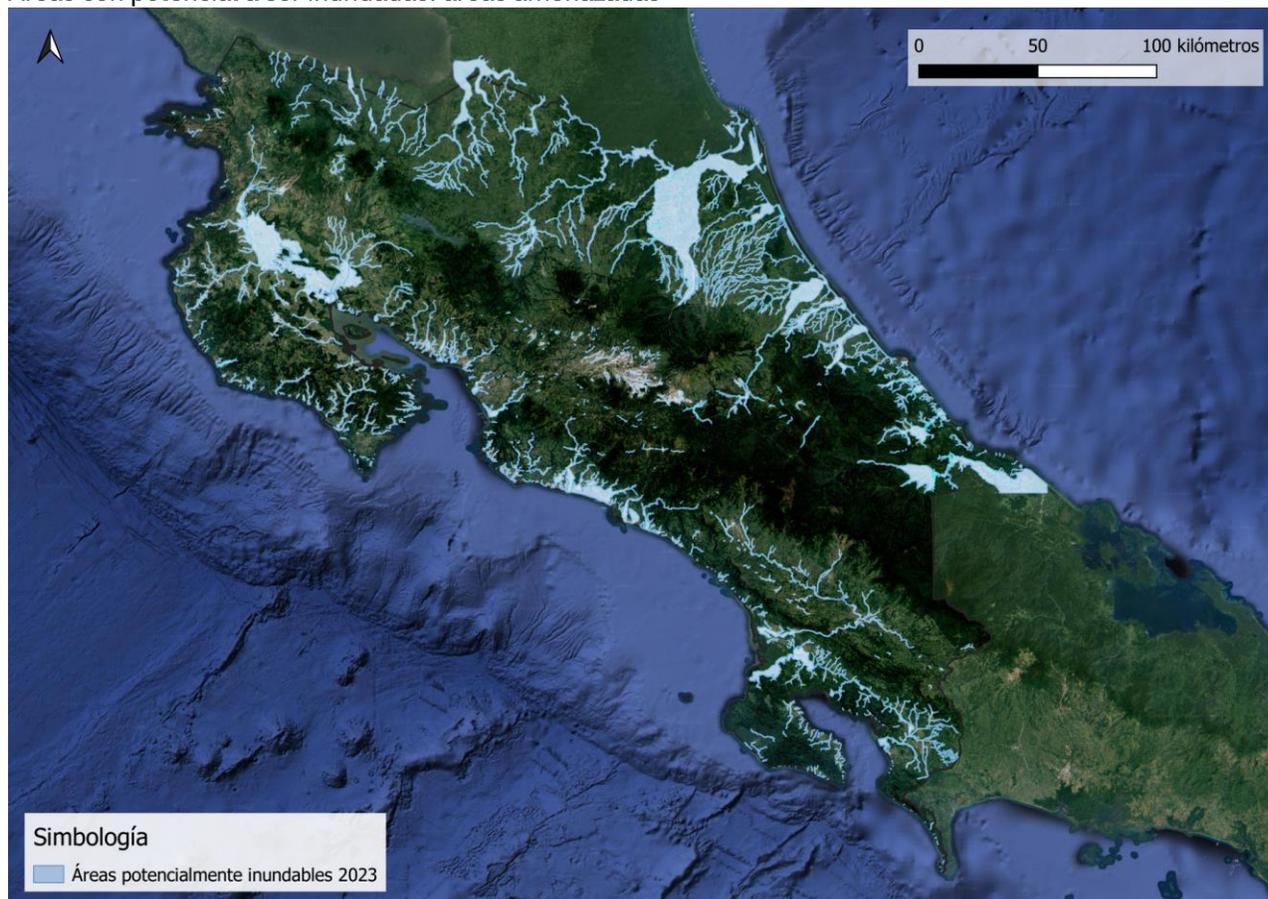
A pesar de que los errores por la identificación de cada año de área urbana se mantienen en un margen bajo, existe la posibilidad de que algún sesgo se presente en forma acumulativa al agregar el área urbana en el tiempo. De tal forma que las edificaciones no identificadas en los años previos, aun estando en un margen de error bajo, estas aparezcan una vez que se comparé el 2014 (último año de la identificación satelital) y el 2017 (capa original del IGN). Aun así, la tendencia de un proceso de crecimiento constructivo es plenamente capturada por la metodología propuesta.

Creación del índice de exposición directa a inundaciones (IEDI)

De acuerdo con la CNE, existen una serie de zonas del país donde la amenaza a verse inundadas en comparación a otras, es alta. Esta capa representa el factor amenaza que el estudio usará para precisar áreas, que, dentro de esta zona, se vean más expuestas a inundaciones. La capa suministrada por la CNE es una versión más precisa que la que se encuentra disponible en el SNIT, y que la CNE suministró para que el estudio pudiera tener una mejor resolución espacial ya que la capa posee una escala 1:25.000, esta se muestra en el mapa 3.

Mapa 3

Áreas con potencial a ser inundadas: áreas amenazadas



Fuente: Elaboración propia con datos de la CNE, 2023.

Para poder identificar zonas con mayor exposición al riesgo en áreas ya consideradas como potencialmente inundables por la CNE se procedió a crear un índice que evidencia mayor o menor exposición a ser inundable. Para esto se incorporaron las siguientes variables:

- Zonas de amortiguamiento o zonas buffer alrededor del margen de un río. Estos fueron creados para ver en forma incremental la exposición a la amenaza en las cercanías de los ríos principales del país ubicados en las zonas inundables. Se pretende respetar la Ley Forestal 7575, que indica que toda construcción debe respetar una franja de quince metros en zona rural y 10 metros en zona urbana a ambos lados de un río. Por lo que los *buffers* construidos pretenden incluir ambas áreas, y así ver la cantidad de edificaciones que pudieran estar en buffers incrementales hasta los 100 metros. Sin embargo, no se distinguió entre urbano y rural, ambos *buffers* se aplicaron por igual al país, debido a las dificultades conceptuales que se identificaron entre los límites urbano y rural en la práctica.

La reclasificación del valor del *pixel* se realizó de tal forma que el *buffer* de 10 metros tendría un peso mayor en la exposición de edificaciones a inundarse, y este peso disminuye conforme se aleja del río.

- *Buffer* de 10 metros: peso=5
 - *Buffer* de 25 metros: peso=4
 - *Buffer* de 50 metros: peso=3
 - *Buffer* de 100 metros: peso=2
 - *Buffer* > 100 metros: peso=1
-
- *Pendiente del terreno*: para incorporar esta variable se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE), a partir del cual se crea un archivo ráster con las pendientes del terreno en porcentaje. Los rangos usados en la clasificación se apegaron al Decreto Ejecutivo número 41960-MAG-MINAE (2019), que considera las pendientes de terreno abajo indicadas. Para asignar pesos a cada variable se tomó en cuenta el artículo 2 de la Ley Forestal, Decreto Ejecutivo 25721 que define a un terreno con pendiente superior a 40% como quebrado. Por lo que conforme las pendientes sean menores a 40% tendrán un peso mayor, y conforme la pendiente sea mayor tendrá un menor peso en la exposición a inundaciones. Por lo que terrenos menos quebrados tendrán más incidencia en la exposición y terrenos más cercanos a ser quebrados tendrán un menor peso. En el caso de las categorías b y c, y f y g, tienen los mismos pesos ya que su incidencia en la exposición se considera equivalente.
- Plana o casi plana: 0-3%: peso=5
 - Ligeramente ondulada: 4-8%: peso=4
 - Moderadamente ondulada: 9-15%: peso=4
 - Ondulada: 16-30%: peso=3
 - Fuertemente ondulada: 31-55%: peso=2
 - Escarpada: 56-75%: peso=1
 - Fuertemente escarpada: >75%: peso=1

Ambas variables arriba detalladas ahora tienen pesos comprendidos entre 1 y 5, siendo el valor mayor una expresión de una mayor exposición a inundaciones. Además, los parámetros cuentan con una ponderación en un mismo rango que el de la capa de *buffers*, por lo que facilita la interpretabilidad y comparabilidad de las operaciones algebraicas posteriores. Todos los procesamientos previos al índice se calcularon con capas ráster y se trabajó por ende a nivel de *pixel*. El Índice de Exposición Directa a Inundaciones se calculó de la siguiente forma:

$$I_{exp} = 2 \cdot R + B + P + A_i$$

Donde:

I_{exp}: se refiere al Índice de Exposición Directa a Inundaciones (IEDI)

R: se refiere a la capa de ríos ya rasterizada, esta se multiplica por un factor de 2 para dar mayor peso al píxel ocupado por los ríos. El valor del píxel de esta capa es de 1. Se utilizó la capa del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) (2014), ver limitaciones para más detalles.

B: es la capa en formato ráster de los *buffers* arriba mencionados ya con las ponderaciones realizadas y agregadas en una sola capa.

P: se refiere a la capa en formato ráster de las pendientes arriba explicadas, y ya ponderadas.

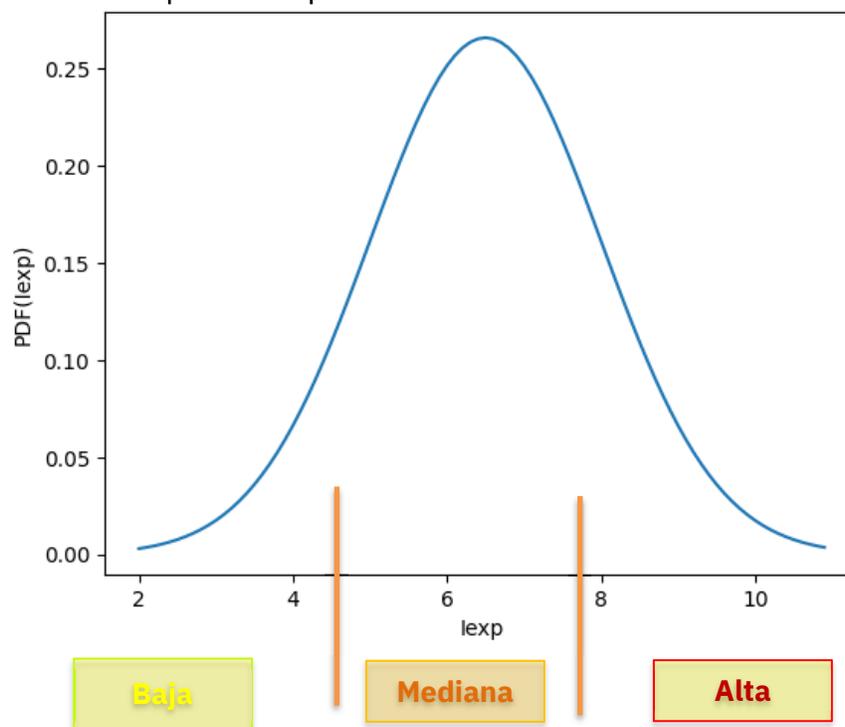
A_i: es la capa rasterizada del área potencialmente inundable que facilitó la CNE (2023). Esta se agrega a la operación algebraica con el propósito de sopesar la exposición que puede tener cualquier edificación por el solo hecho de estar ubicada dentro de esta zona previamente identificada por la CNE. El valor del píxel de esta capa es de 1.

Una vez estimado el **I_{exp}**, se procedió a reclasificar este para poder crear tres zonas de análisis, una de baja exposición, una de exposición media y una de exposición explícita alta al riesgo de inundaciones. Es conveniente hacer la reclasificación de las 20 clases creadas mediante el uso de las medidas de tendencia central, para que los límites de las categorías finales tengan un sustento real del comportamiento de los datos y de su agrupación real.

Por lo que, la capa en formato ráster final **I_{exp}** se reclasificó utilizando la media como punto central, el valor mínimo era de 2 y el valor máximo de 13, la *media*=6.5, y la *desviación estándar*=1.5. De esta forma, una desviación estándar a cada lado de la media conforma el área de exposición media, la cola de menor valor representa los píxeles que caen en un área de baja exposición a inundaciones, y por último la cola de valores mayores representa los píxeles que se encuentran en el área de mayor exposición. La reclasificación culmina con tres zonas: 1. Baja exposición, 2. Exposición media, 3. Alta exposición, ver gráfico 1. Una vez realizado este proceso se procedió a vectorizar la capa resultante para poder, así, estimar el área de edificaciones que caerían en cada tipo de zona: baja exposición, exposición media y alta exposición. Se calculó cada área en hectáreas de edificaciones dentro de cada zona de riesgo para 1986, 1996, 2006, 2014 y 2017.

Gráfico 1

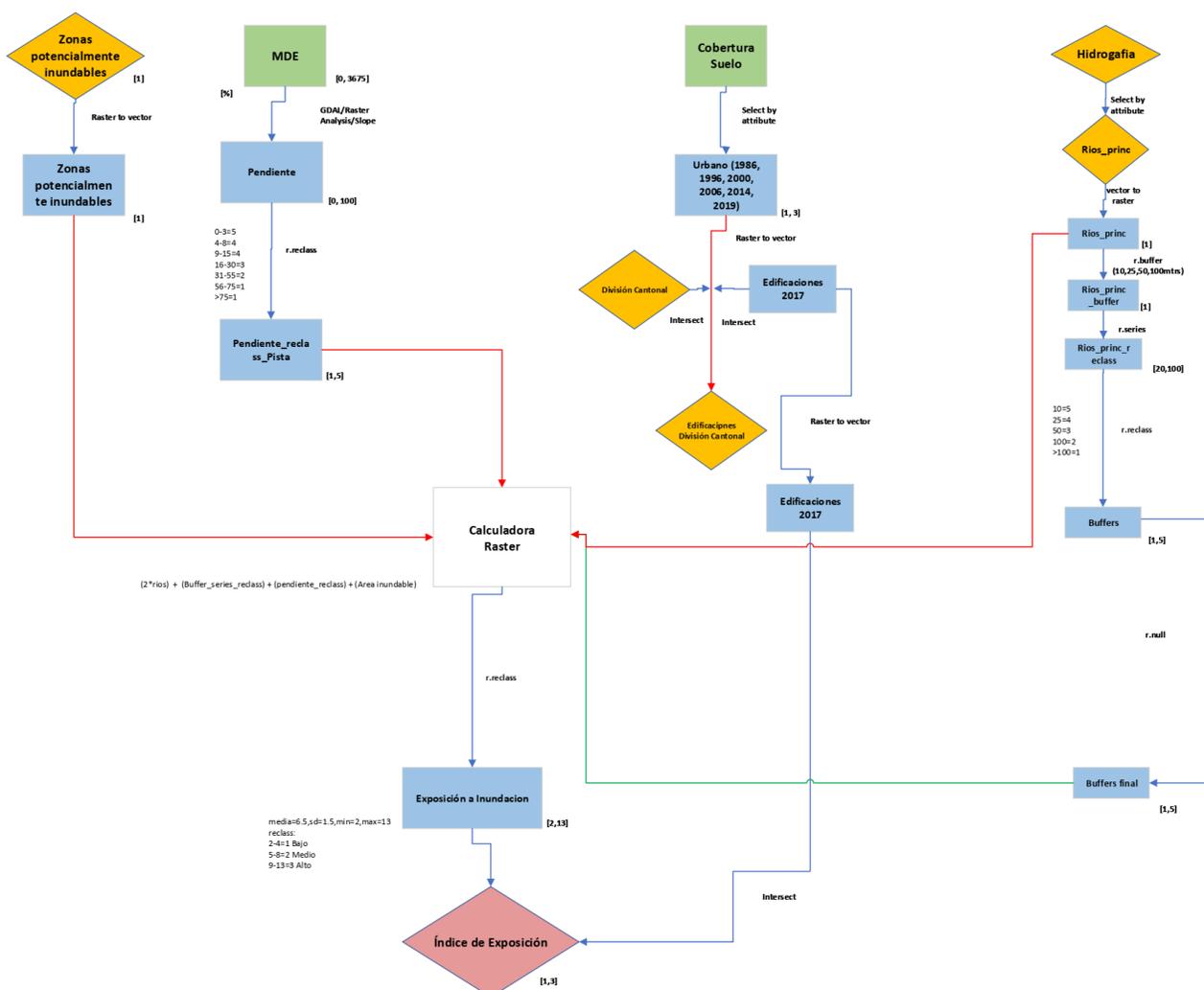
Reclasificación de zonas de exposición I_{exp}



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 y de la CNE, 2023.

Es importante mencionar, que entre 1986 y 2017 solo se cuenta con una capa de zonas potencialmente inundables, por lo que con prudencia el estudio asumió que esta área no ha sufrido grandes cambios en el período de tiempo mencionado. El modelo cartográfico en el diagrama 2 muestra los procesamientos, capas usadas y rango de valores usados para llegar al resultado final.

Diagrama 2
Modelo cartográfico de la identificación de zonas de exposición a inundaciones



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, con datos de la CNE, 2023 e IGN, 2022.

Limitaciones

Se decidió usar la capa de ríos que el TEC (2014) tiene a disposición, en un principio el objetivo era usar la capa de cuerpos fluviales que el SNIT tiene a disposición y que tiene una mayor resolución espacial que la capa del TEC, sin embargo, esta capa presentaba algunos problemas en varias zonas donde existen áreas potencialmente inundables, ya que posee faltante de datos.

Finalmente, se decidió hacer el cambio de fuente, a pesar de eso, la verificación y validación de resultados muestran que estos son bastante satisfactorios.

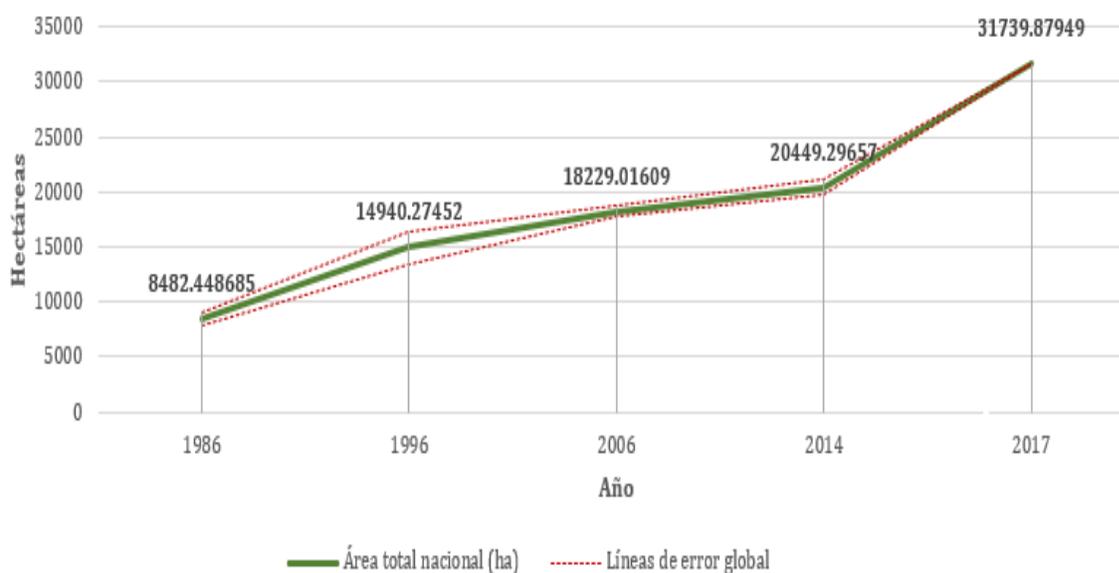
Resultados

A continuación, se presentan los resultados los apartados explicados en la sección de Metodología. Es conveniente aclarar que el Índice de Exposición Directa a Inundaciones no incorpora a las edificaciones, sino que su propósito es, en este punto, permitir cuantificar cuantas edificaciones hay en cada una de las tres áreas de exposición identificadas. El objetivo es que este índice sirva a las autoridades como la CNE para mejorar su trabajo logístico ante eventuales inundaciones. Por limitaciones de tiempo, no se incluyó la estimación de las tres zonas, y la inclusión del posible peso de las edificaciones en un índice mejorado que se estime a nivel distrital para cada uno de los años, esta tarea queda para trabajo futuro.

Áreas urbanas y edificaciones: 1986, 1996, 2006, 2014, 2017

Tal y como se detalló en el apartado metodológico se reconstruyó la capa de edificaciones 2017 hacia períodos previos en el tiempo usando imágenes satelitales. Seguidamente, se presentan algunos ejemplos de cantones a manera de ejemplo, sin embargo, no se profundizará más en esto ya que el objetivo del trabajo es la cuantificación en las zonas de exposición a inundaciones, y no analizar en detalle el crecimiento de edificaciones cantonales en el tiempo. El análisis específico a nivel distrital y cantonal de las edificaciones se deja para otra investigación futura. El gráfico 2 presenta una evolución creciente de las edificaciones a nivel país.

Gráfico 2
Evolución del área de edificaciones de Costa Rica. 1986-2017
(hectáreas)



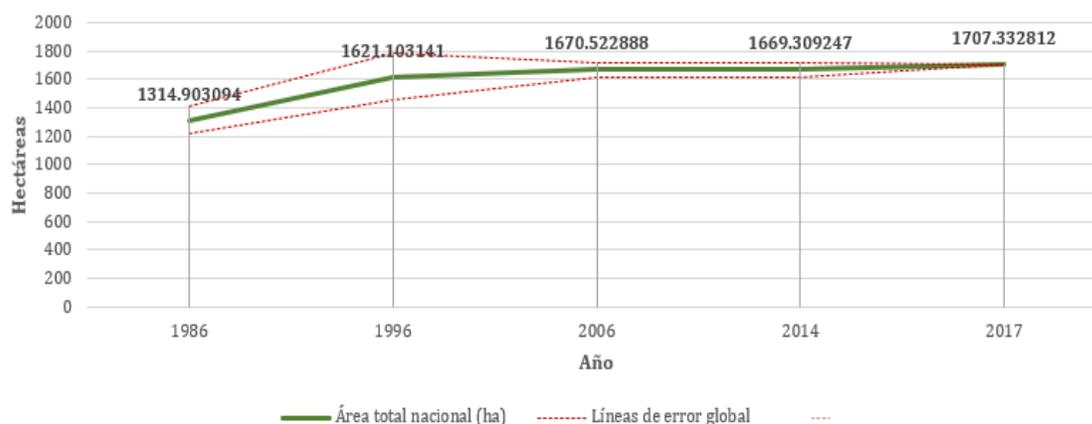
Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 e IGN, 2022.

Tal como se muestra en el gráfico anterior, existe una clara tendencia hacia el crecimiento del uso urbano. En el período analizado, este creció aproximadamente 23.200 hectáreas, especialmente en los períodos 1986-1996 y 2014-2017.

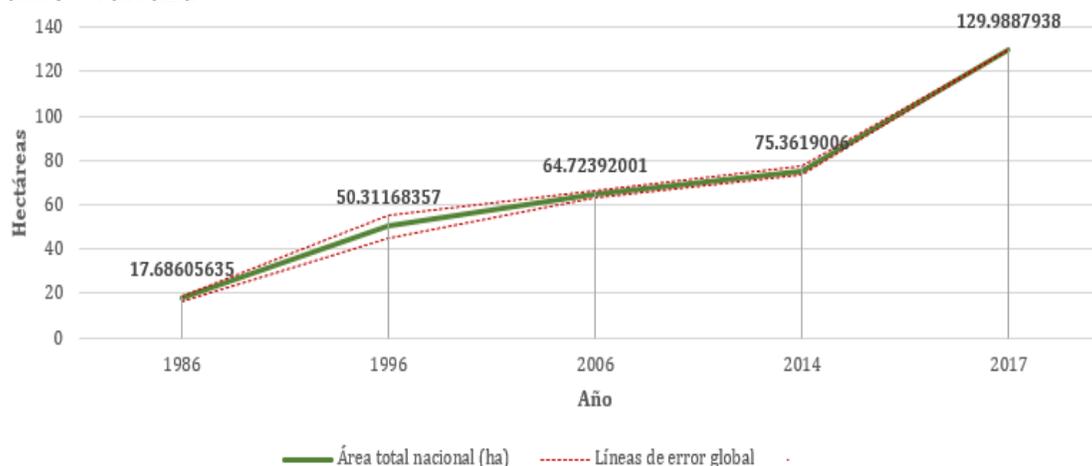
A nivel cantonal, se identifican dos tendencias temporales. En primer lugar, un grupo de cantones urbanos, ubicados en la GAM, que experimentaron un crecimiento leve en el período 1986 – 1996 y posteriormente mantuvieron un comportamiento estable, debido a que ya no contaban con territorio disponible para construir edificaciones. Este es el caso de los cantones como San José y Tibás, entre otros. En segundo lugar, un grupo de cantones mayoritariamente rurales cuya evolución es similar a la mostrada en gráfico 1. Por ejemplo, Tarrazú, cuya área de uso urbano se multiplicó por 7 en 30 años, ver gráfico 3.

Gráfico 3
Evolución del área de edificaciones de los cantones de San José y Tarrazú. 1986-2017

Cantón San José



Cantón Tarrazú



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 e IGN, 2022.

Al analizar la distribución cantonal de hectáreas de uso urbano, se aprecia que en el año 1986 los cantones con mayor cantidad de hectáreas coinciden con las cabeceras de provincia, por ejemplo, San José (1.314,9 ha), Alajuela (715,3 ha) o Cartago (459,8 ha). Estas cabeceras siguen manteniendo los valores altos en 1996, 2006 y 2014, a la vez que empiezan a sobresalir ciertos cantones conocidos como ciudades intermedias⁴, por ejemplo, Puntarenas y San Carlos en 1996, San Ramón, Pococí y Pérez Zeledón en 2006 y Limón en el 2014.

Al igual que en los años anteriores, en el 2017 sobresalen cantones y distritos correspondientes a cabeceras de provincia y ciudades intermedias. A su vez, se añaden múltiples territorios con valores ubicados en las dos categorías más bajas, fenómeno visible en el salto entre los años 2014 y 2017. Como ejemplo, se muestra en los mapas 4 que detalla la evolución espacial del uso urbano en edificaciones para Guápiles, mapeando cada año de manera individual, lo cual brinda una idea clara sobre los patrones de crecimiento.

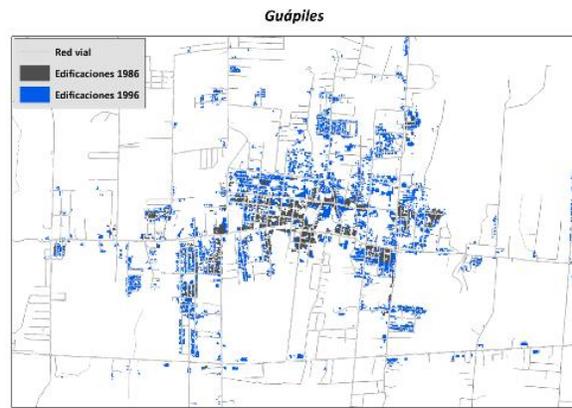
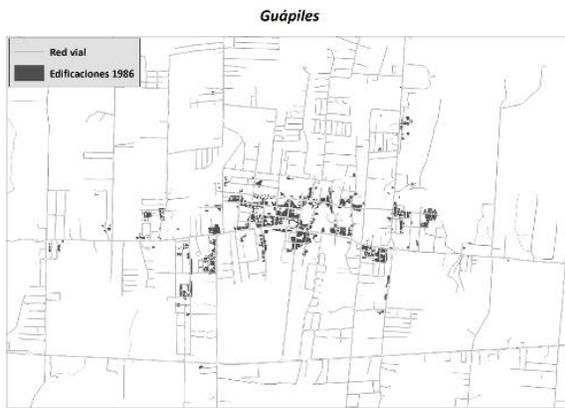
⁴ Las ciudades intermedias realizan intermediación de actividades económicas y sociales dentro de un territorio. Es ese rol funcional el que las diferencia por encima de su tamaño (Sánchez, 2021).

Mapas 4

Distribución espacial del crecimiento de edificaciones en Guápiles. 1986 – 2017

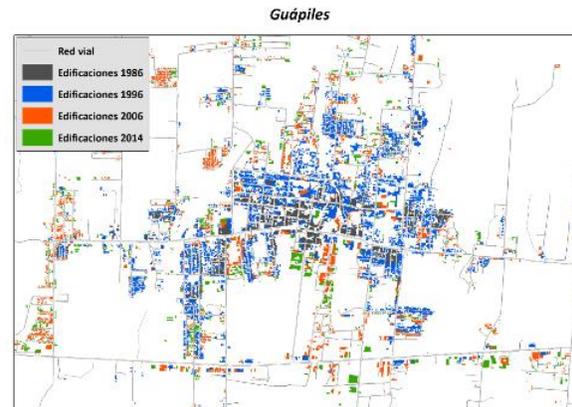
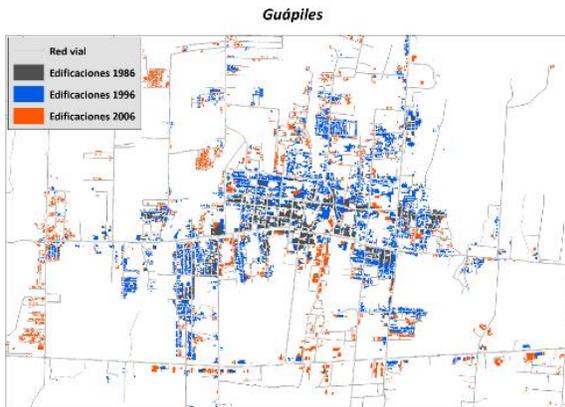
1986

1996



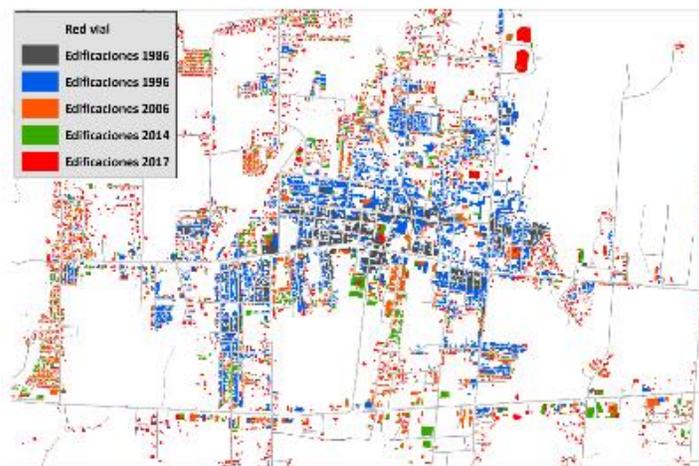
2006

2014



2017

Guápiles



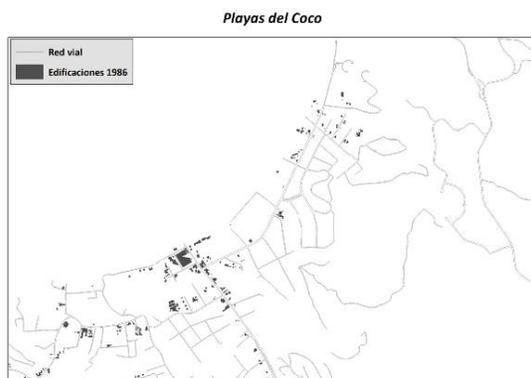
Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 e IGN, 2022.

En 1986 las edificaciones se concentraban en un casco central conformado por 12 cuadrantes, mientras que para 1996 (correspondiente al período 1987 – 1996) se había experimentado un crecimiento exponencial (concordante con la tendencia temporal identificada en la figura mostrada) alrededor de dicho centro y sobre las calles que conectan la avenida principal del pueblo con la carretera 32. En el mapa del año 2006 el crecimiento urbano fue menor que en 1996; por el contrario, entre 2014 y 2017 se volvió a experimentar un vertiginoso crecimiento y más expandido hacia las afueras del centro de la ciudad. De la misma manera, en los mapas 5 se puede observar el desarrollo espacial de las edificaciones en el pueblo Playas del Coco. En este caso el cambio más radical se encuentra en el mapa del año 2006, correspondiente al período 1997 – 2006, período en el cual este pueblo experimentó un *boom* inmobiliario de construcción de edificaciones.

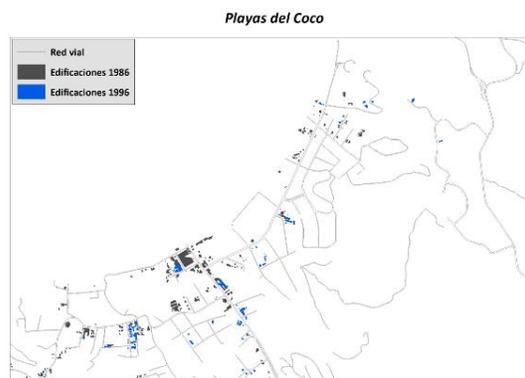
Mapas 5

Distribución espacial del crecimiento de edificaciones en Playas del Coco. 1986 – 2017

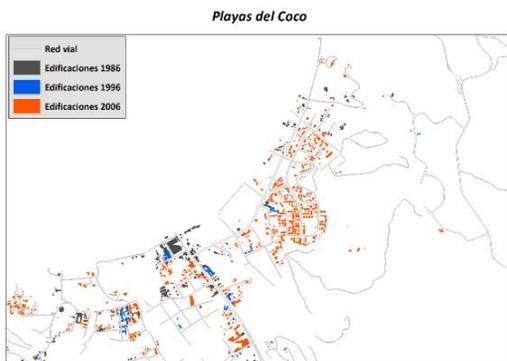
1986



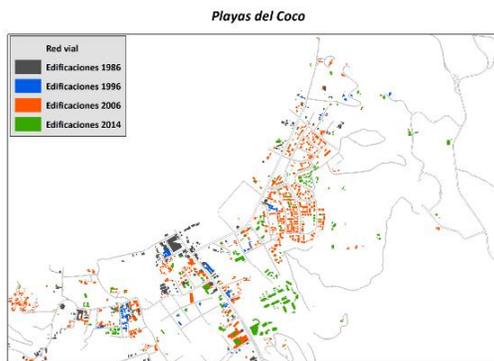
1996



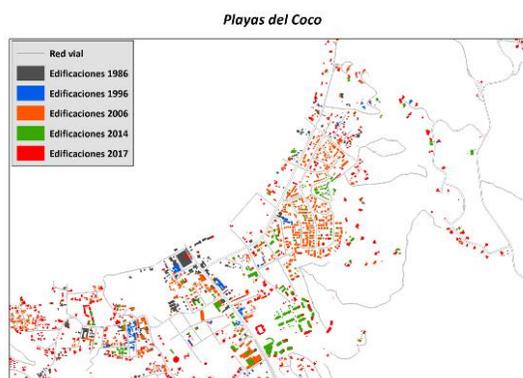
2006



2014



2017



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 e IGN, 2022.

Para cerrar, es preciso recordar que este trabajo fue necesario para poder, posteriormente, ubicar dichas edificaciones dentro de áreas potencialmente inundables, que es el objetivo central del estudio, y a la vez ver el crecimiento que dichas edificaciones pudieron haber tenido en zonas de mayor o menor riesgo a inundaciones.

Índice exposición directa a inundaciones (IEDI)

Una vez elaborado y reclasificado el Índice de Exposición Directa a Inundaciones, se procede a cuantificar primeramente las zonas de baja, media o alta exposición. El mapa 6 muestra la distribución espacial del área potencialmente inundable en cada una de las tres categorías construidas. Como se observa, hay regiones del país con gran concentración de áreas inundables, como es el caso de las áreas alrededor del río Tempisque y en la Zona Norte, en el cantón de Sarapiquí.

Los resultados aquí abordados se presentarán en términos de la sumatoria a nivel país, y se presentarán algunos ejemplos para mostrar la utilidad del índice creado. Por limitaciones de tiempo, no fue posible cuantificar las tres zonas de exposición a nivel de distrito y de cantón, en cuyo caso esta ampliación del estudio queda para trabajo futuro.

Mapa 6

Distribución espacial de las áreas de exposición a inundaciones. 2017



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 y con datos de la CNE, 2023.

Tal y como lo detalla el cuadro 2, la zona exposición media es la que abarca mayor área en el país, con 303.956 hectáreas. En segundo lugar, están las zonas con alta exposición, éstas suman 65.464,4 hectáreas en el país, mientras que las zonas de bajo exposición suman 16.915,8 hectáreas. Las zonas en alta exposición representan un área nada despreciable (654.644.000

m²) casi 654,5 millones de metros cuadrados, esto invita a las autoridades a tener que priorizarlas por encima de zonas de baja exposición.

Cuadro 2
Cuantificación de las zonas de exposición a inundaciones

Exposición directa	Hectáreas
Alta	65.464,4
Media	303.956,0
Baja	16.915,8

Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 y de la CNE, 2023.

Seguidamente, se procede a cuantificar las edificaciones que se localizan en las zonas de exposición creadas para los años de 1986, 1996, 2006, 2014 y 2017 (para detalles ver la sección de metodología). El cuadro 3 y el gráfico 4 muestran que las edificaciones en los tres tipos de zonas de exposición aumentaron en el tiempo, y en forma constante. Si bien las edificaciones en las tres zonas crecen más vertiginosamente entre el 2014 y el 2017, es en las zonas de mediana exposición al riesgo en las que se da un cambio más vertiginoso, 124%. En el caso de las zonas de exposición media, además es entre 1986 y 1996, donde se da un crecimiento importante, del 135%.

Entre 1986 y 2017 en las zonas alta y baja, el crecimiento ha sido en forma más escalonado. Las edificaciones en la zona de alta exposición crecieron entre 1986 y 2017 en un 443,8%, un 14,32% en promedio por cada año. Por otro lado, en las zonas de baja exposición las edificaciones entre 1986 y 2017 crecieron un 1.628,5%, lo que es 52,44% en promedio anual. Por último, las edificaciones en mediana exposición crecieron, entre 1986 y el 2017, en un 635,7%, lo que es un 20,51% en promedio por año.

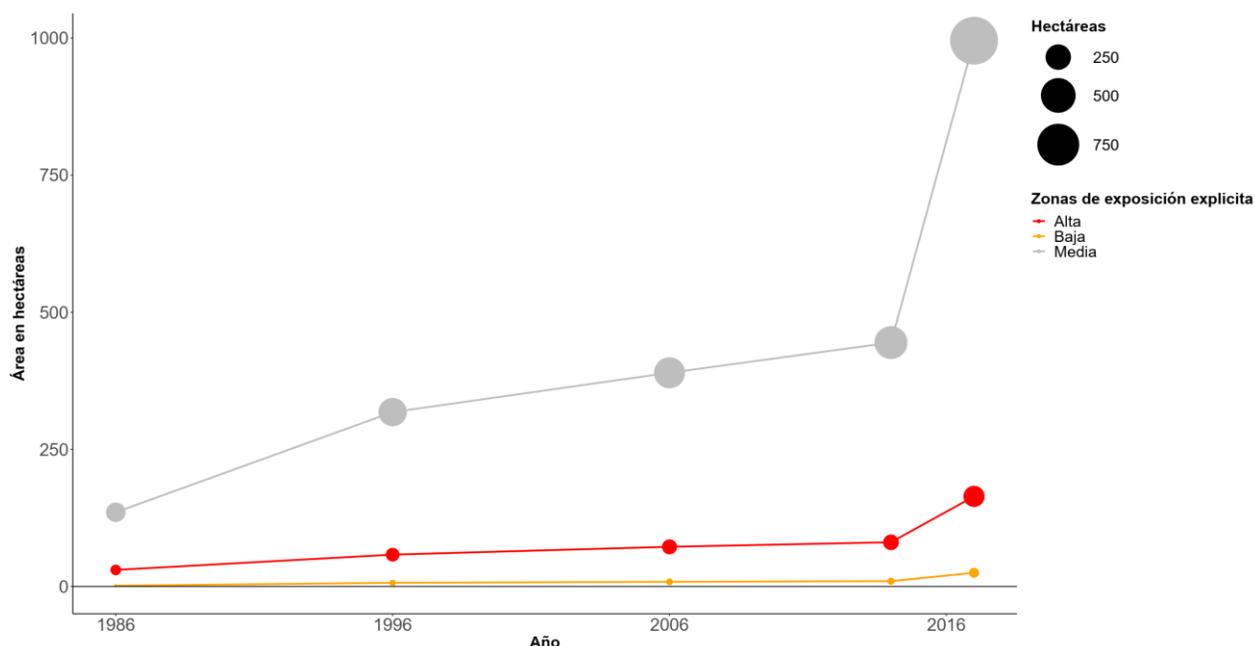
Cuadro 3
Cuantificación de edificaciones en áreas de exposición a inundaciones (hectáreas)

Exposición	1986	1996	2006	2014	2017
Alta	30,20	58,06	72,35	80,63	164,24
Media	135,29	317,96	389,66	444,75	995,29
Baja	1,45	6,70	8,50	9,65	25,02

Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, del IGN, 2022 y de la CNE, 2023.

Gráfico 4

Tendencia del área de edificaciones construidas en las tres zonas de exposición a inundaciones. 1986-2017



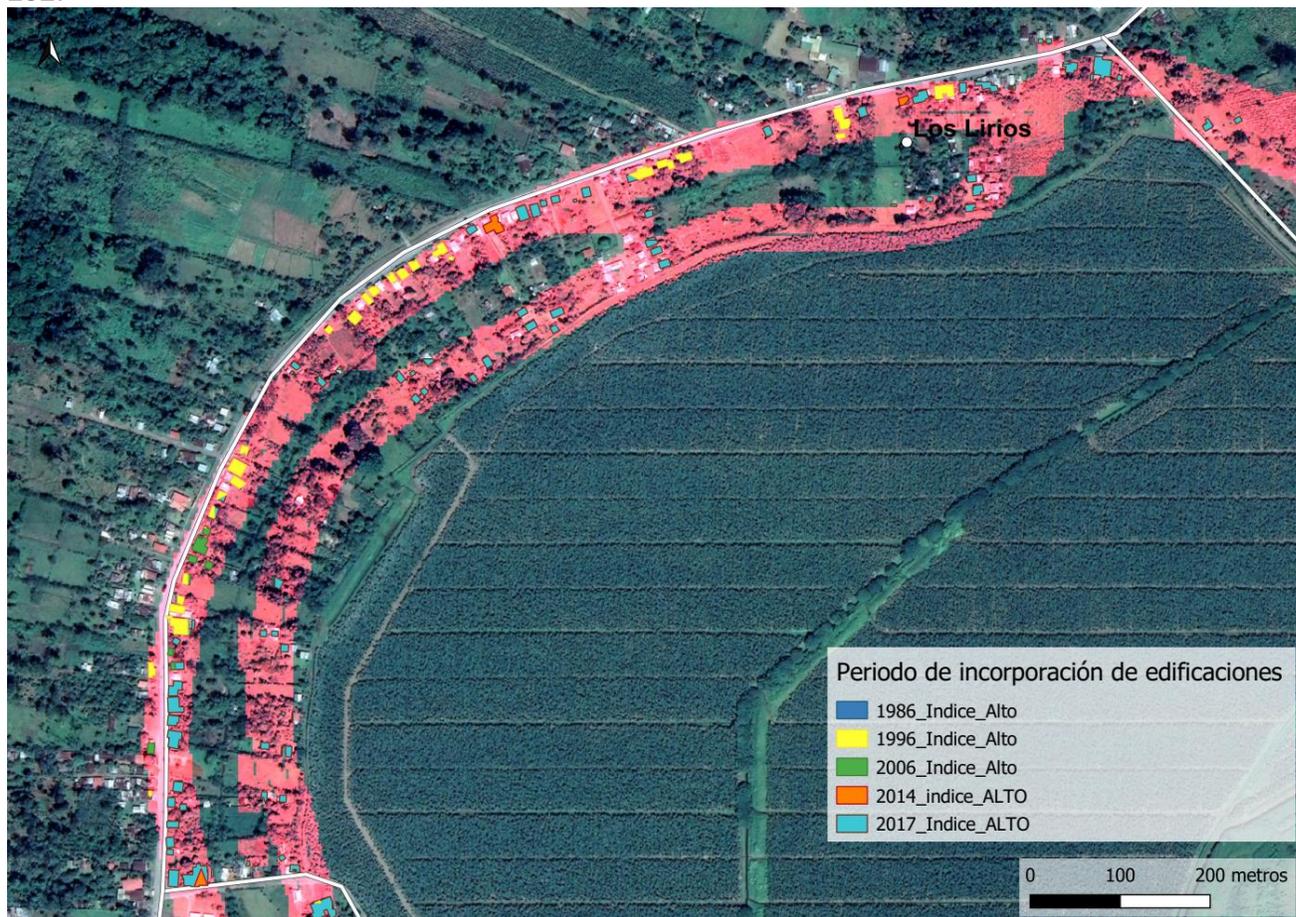
Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, del IGN, 2022 y de la CNE, 2023.

Para poder ver como se percibe esto en el campo, se procede a mostrar ejemplos de lugares donde se sufre de inundaciones, y donde las edificaciones se ven afectadas por estos eventos.

Primeramente, abajo se presenta un ejemplo de cómo se observan los datos brindados de crecimiento de edificaciones en el tiempo (1986-2017) para la zona de alta exposición a inundaciones. El caso de estudio que se muestra en el mapa 7, indica que, en el poblado de Los Lirios (Sarapiquí), las edificaciones levantadas en una zona de alta exposición, se da en dos momentos, principalmente. Hasta 1996, las edificaciones de color amarillo, que suman 0.30 hectáreas, y un segundo momento, entre 1996 y 2017, que aumenta en 0,82 hectáreas. Esto es un crecimiento del 2 73% de las edificaciones en la zona de alta exposición en Los Lirios entre 1996 y 2017. Lo que es preocupante, ya que se construye en un periodo de 31 años en zonas de alta exposición a un fenómeno recurrente y en una región identificada previamente como potencialmente inundable. Por lo que una posible inundación futura se puede concretar en cualquier momento, e inclusive convertirse en algo aceptado con el tiempo. Además, el construir en zonas expuestas a inundaciones es un problema recurrente, ya manifestado en la literatura (Arroyo, 2009; Salgado, 2009, Sánchez, 2021; PEN, 2021), aquí se brindan las evidencias de cuándo y dónde se han realizado estas, para el caso de zonas inundables.

Mapa 7

Zona de Alta Exposición a Inundaciones del poblado Los Lirios (Sarapiquí): evolución de edificaciones. 1986-2017



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, de IGN, 2022 y de la CNE, 2023.

Impacto en poblaciones locales

Es posible obtener un aproximado de la población que se puede ver afectada directa e indirectamente dentro de un área determinada, que aquí se encontrará dentro de un perímetro llamado *Isocrona*. Este dato se obtiene a partir del *plug-in ORS Tools* en QGIS (2023), que basa su información en datos del *Global Human Settlement Layer* (GHSL), de la Comisión Europea, que se alimenta con los datos generados por el proyecto *Copernicus Emergency Management Service* de la Agencia Espacial Europea (European Commission, 2023).

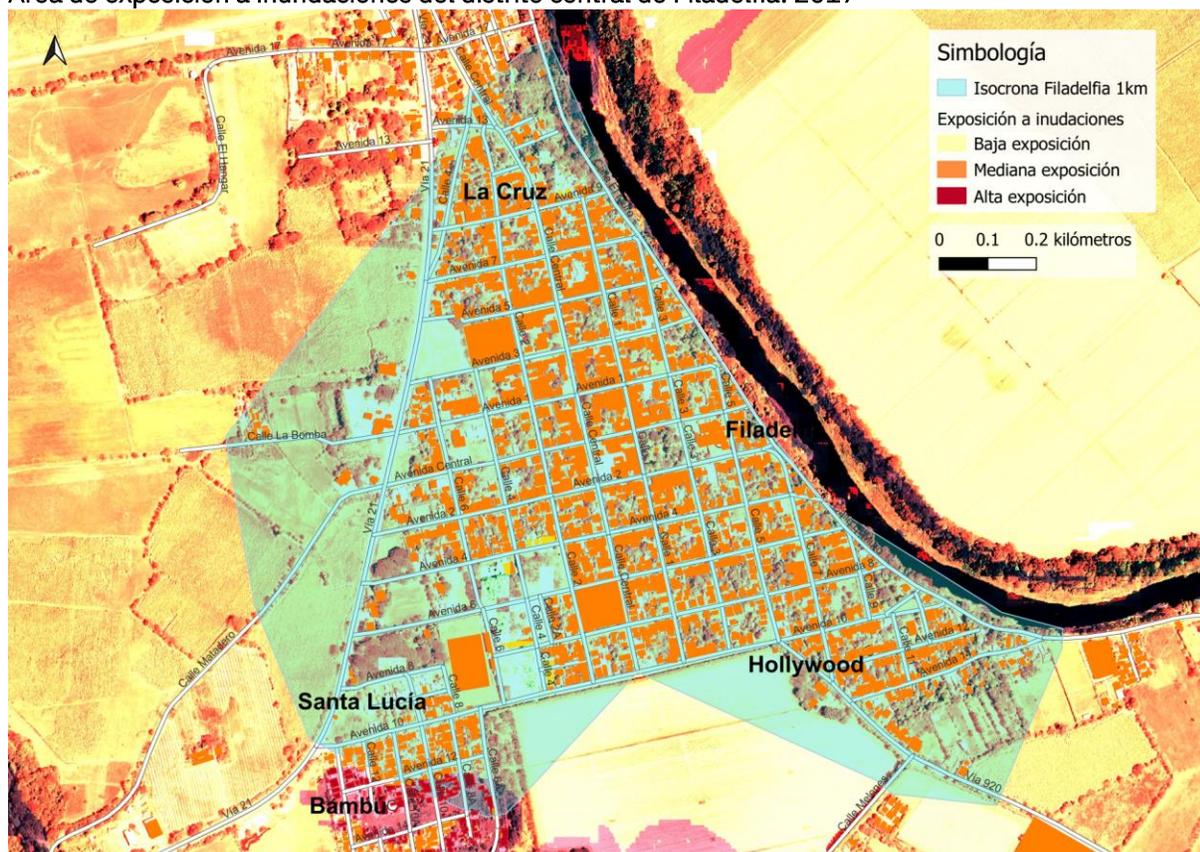
El objetivo de este apartado es permitir visualizar lo importante que es tener información detallada a nivel espacial en la gestión local del riesgo, ya que esta contempla el desplazar a personas en poco tiempo. Por lo que la priorización de zonas de alta exposición a inundaciones reviste de importancia a la hora de tomar decisiones y salvar vidas.

El caso de Filadelfia (Guanacaste)

La población afectada en el área de la *Isocrona* es de 4.482 personas. Esta área se estima a partir de 1 kilómetro alrededor del centro de población y extendiéndose a los límites hasta donde haya edificaciones. En el ejemplo, esta cubre un área de 140 hectáreas, ver mapa 8.

Mapa 8

Área de exposición a inundaciones del distrito central de Filadelfia. 2017



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, IGN, 2022, CNE, (2023 y de la European Commission, 2023.

Tal y como se muestra en el cuadro 4, la zona de exposición media es de 135,5 hectáreas, la de alta exposición es de 1,75 hectáreas y la de baja es de 3,2 hectáreas. Si tomamos solamente el área edificada 23,5 ha se catalogan como exposición media, 0,3 ha como exposición baja y 0,1 ha de alta exposición. Por lo que, con esta información la CNE tendría un insumo valioso, primero para saber las dimensiones de las zonas a priorizar en una alta exposición a inundaciones, y segundo, se puede prever a cuantas personas podrían llegar a ser desplazadas dentro del área marcada. En este caso, el sector del Bambú es sin duda el sector con una alta exposición, por lo que sería prioridad en caso de una eventual amenaza climática.

Cuadro 4

Cuantificación de las zonas y edificaciones expuestas a inundaciones dentro de la *Isocrona* de Filadelfia, 2017

Exposición al riesgo 2017	Área en hectáreas	Área de edificaciones en hectáreas
Alta	1,75	0,1
Media	135,5	23,5
Baja	3,2	0,3

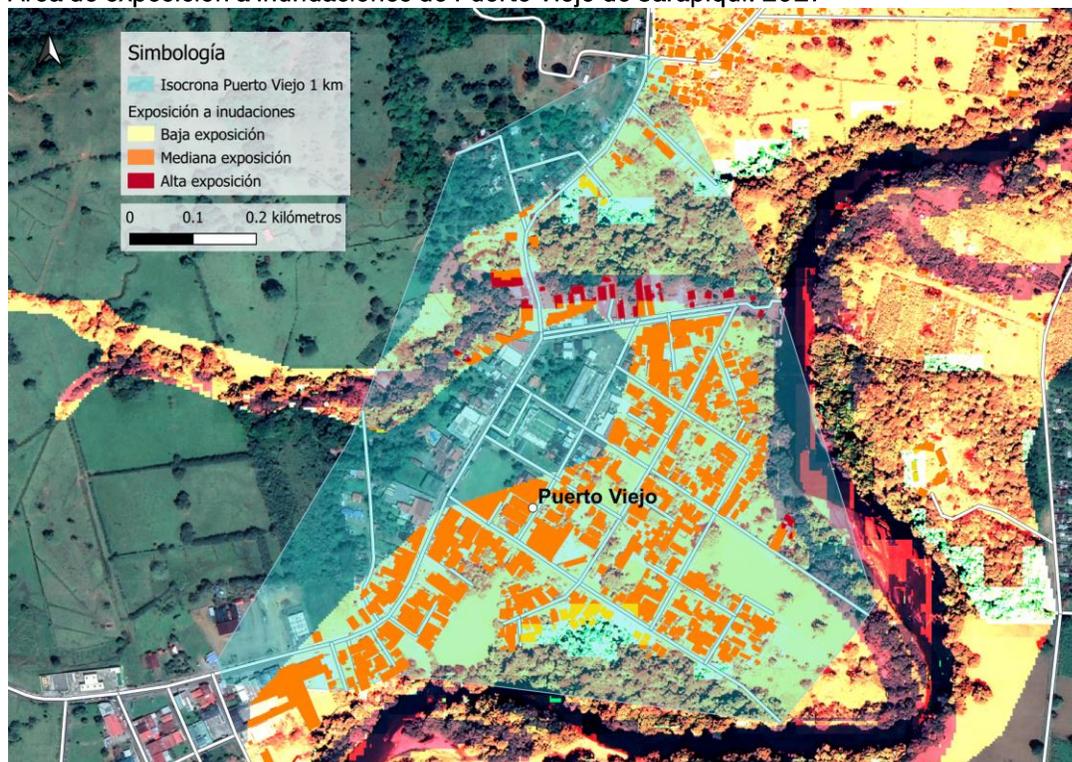
Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 e IGN, 2022 y CNE, 2023.

El caso de Puerto Viejo de Sarapiquí (Heredia)

Similar al caso anterior, se aplicó el análisis usando una *Isocrona* al Puerto Viejo de Sarapiquí. En este caso, la población afectada dentro de la *Isocrona* es de 9.920 personas. Esta área se estima a partir de 1 kilómetro alrededor del centro de población y extendiéndose a los límites hasta donde existen edificaciones, esta cubre un área de 66 hectáreas, de las cuales 48,4 (73,3%) están dentro de áreas potencialmente inundables, tal y como se muestra en el mapa 9.

Mapa 9

Área de exposición a inundaciones de Puerto Viejo de Sarapiquí, 2017



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, IGN, 2022, CNE, 2023 y European Commission, 2023.

El cuadro 5 resume los datos del área afectada para cada zona. La mayor proporción es de la zona de exposición media, 39,6 hectáreas, seguido de las de alta exposición, 6,3 hectáreas, y la baja exposición con 2,4 hectáreas. Las edificaciones siguen una distribución similar, en zona media hay 8 hectáreas, en zona alta 0,40 hectáreas y en baja 0,31. En el caso de Puerto Viejo las zonas y edificaciones en alta exposición son mayores que en el caso de Filadelfia, por lo que es importante señalar, que existe esta heterogeneidad, por ende, cada caso de estudio debe ser debidamente analizado y planificado previo a cualquier decisión. En este caso, el sector norte de Puerto Viejo es el que tendría una mayor exposición a inundaciones, por lo que, en una primera instancia de atención, sería el sector por priorizar.

Cuadro 5

Cuantificación de las zonas y edificaciones expuestas a inundaciones dentro de la *Isocrona* de Puerto Viejo. 2017

Exposición al riesgo 2017	Área en ha	Área de Edificaciones en ha
Alta	6,33	0,40
Media	39,60	8,00
Baja	2,45	0,31

Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021 e IGN, 2022 y CNE, 2023.

Cuantificación de posibles pérdidas económicas en edificaciones

Finalmente, se hizo el ejercicio de aproximar económicamente el valor de aquellas edificaciones que están ubicadas en zonas de alta exposición a inundaciones. El objetivo es estimar un posible costo de reposición de las edificaciones ante una eventual pérdida por inundación.

La base fue la guía metodológica que se publicó en la Gaceta del miércoles 20 de octubre del 2021, esta se denomina Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva del Ministerio de Hacienda (Ministerio de Hacienda, 2021), adicionalmente, se usaron las categorías presentes en la capa de Infraestructura 2017 (IGN, 2022), para identificar posibles costos de reposición de aquellas edificaciones, que estando dentro de área con potencial a inundación, que estén en zonas de alta exposición, con la interpretación de que estas se pueden ver altamente comprometidas.

De acuerdo con cada categoría se identificó la de menor costo en el Manual de Valores Unitarios. Por ejemplo, si la categoría de la capa de infraestructura corresponde a una vivienda, entonces a edificación se le imputa el valor de menor valor en el manual del Ministerio de Hacienda, que sería en este caso la vivienda de concreto-prefabricada código VC01, este valor representa, entonces, un aproximado al mínimo costo de reponer esa vivienda. De esta misma forma se procedió con todas las categorías de la capa de infraestructura, tal y como se muestra en el cuadro 6.

Es importante recalcar que las categorías que posee la capa de edificaciones son muy generales, por lo que este ejercicio se debe de tomar de la misma forma, como una aproximación general a un posible costo mínimo de reposición. El objetivo es tener un valor de piso o mínimo sobre el cual se pueda, al menos, tener una idea aproximada de lo que puede representar las posibles pérdidas de infraestructura en zonas de alta exposición a inundaciones.

Cuadro 6

Valoración económica de la reposición de edificaciones en zonas de alta exposición a inundaciones. 2017

Categoría en la capa de edificaciones	Categoría en Manual	Cantidad	Hectáreas	M ²	Valor por m ²	Costo Total de Reposición
Edificio o casa independiente	VC01 Casa de concreto (prefabricada)	14.184	132,70	1.327.773,20	240.000	318.665.572.080
Centro educativo	EA01 Edificio Educativo	73	1,60	15.715,54	228.000	358.3143.394
Asilo de ancianos	HR01 Hogares de Retiro	1	0,01	34,51	400.000	13.805.280
Cementerio	NA	16	2,40	23.998,30	0	0
Plaza / Cancha	NA	120	8,90	88.773,07	0	0
Edificio religioso	CP01 Edificios Religiosos	4	0,10	868,21	440.000	382.012.752
Estación de Policía	NS	2	0,10	536,16	0	0
Industria	EO01 Edificios de oficinas	6	0,20	2.296,96	370.000	849.877.087
Supermercado	LC01 Locales comerciales	1	0,05	527,52	220.000	116.055.786
Hotel	HT01 Hotel	80	1,40	13.898,06	640.000	8.894.755.904
Parque municipal	NA	11	0,50	4.995,98	0	0
Centro deportivo	NA	6	0,90	9.326,73	0	0
Invernadero	AM04 Cubierta plástica	77	9,00	90.618,68	12.000	1.087.424.204
Represa hidroeléctrica / represa	NA	25	0,60	6.505,39	0	0
Tanque de combustible	TC01 tanque de almacenamiento de combustible (por unidad)	3	0,01	117,80	3.460.000	10.380.000
Redondel / Plaza de toros	RD01 Redondel abierto	10	0,30	3.526,992	40.000	141.079.888
Hospital y centro de salud	HP01 Hospitales	2	0,05	470,81	620.000	291.903.502
Estadio	NA	2	0,30	2.875,11	0	0
Campo de golf	NA	17	3,30	33.494,05	0	0
Silo	NA	8	0,10	818,57	0	0

Diseño del índice de exposición a la amenaza natural de inundaciones: el caso de exposición de edificaciones

Categoría en la capa de edificaciones	Categoría en Manual	Cantidad	Hectáreas	M ²	Valor por m ²	Costo Total de Reposición
Compuerta	NA	1	0,02	171,73	0	0
Ruinias/Monumentos	NA	1	0,01	123,45	0	0
Gimnasio	GM01 Gimnasios	1	0,01	10,90	315.000	3.432.618
Subestación eléctrica	NA	4	1,30	12817,18	0	0
Estación de combustible	ESC1 Estación de servicio terrestre (Gasolinera)	1	0,03	345,20	115.000	39.698.610
Parque zoológico	NA	8	0,10	1465,30	0	0
Planta eléctrica	NA	12	0,03	294,42	0	0
Total						334.079.141.105

Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, IGN, 2022, CNE, 2023 y Ministerio de Hacienda, 2021.

Se estima que el costo de reponer todas las edificaciones del país que estén en zonas de alta exposición a inundaciones es de 334.000 millones de colones, aproximadamente. De esta cantidad el 95,4% (circa 318,6 mil millones de colones) correspondería a la reposición de casas independientes y edificios de algún tipo. Para tener una idea de la magnitud de este monto, de acuerdo con Vargas y Madrigal (2022) para el 2021 el gasto en construcciones incluyendo el sector social, servicios públicos, transporte y otros, sobrepaso los 400.000 millones de colones. Eso quiere decir que reponer la infraestructura en zonas de alta exposición representa alrededor del 76% de lo que en todo el 2021 se gastó en construcción de infraestructura pública.

Es importante mencionar que, las categorías con el nombre de NA indican que son un tipo de edificación que se encuentra registrada en la capa de edificaciones, pero que no es claro la categoría a la cual equivaldría en el Manual del Ministerio de Hacienda, o que del todo no está en el manual, por lo que se le asigna un valor de cero colones. Por lo cual se puede asumir que la valoración tenderá a la subestimación del valor total. Esta se podrá ajustar a futuro, para que se llegue a tener un valor más cercano a la realidad. Como se mencionó, el objetivo es estimar un valor mínimo de reposición de las edificaciones, como punto de partida, pero que dé una idea inicial de la magnitud y de la importancia económica de planificar e invertir en la prevención del impacto que las inundaciones. Además, en un contexto de cambio climático, donde las inundaciones tanto como las sequías se esperan que impacten a las poblaciones de todo el mundo (Uribe, 2015), es necesario generar mecanismos de prevención para evitar una mayor cantidad de pérdidas humanas y materiales.

Para visualizar la utilidad de esta información, a continuación, se presenta un ejemplo de la estimación del costo de reposición para un área determinada. Para el caso de Río Frío, el ejemplo estima un área de 14.408 metros cuadrados de infraestructura, en 63 edificaciones que se ubican en un área de alta exposición a inundaciones, ver mapa 5. Estas edificaciones en su mayoría son edificios o casas de habitación, el costo de reposición de estas sería de 3.458.112.360 colones, esto es 3.500 millones de colones, aproximadamente. El mapa 10 tiene

la representación espacial del ejemplo de Río Frío, y el costo de reposición para cada edificación dentro de la zona de alta exposición.

Mapa 10

Costo de reposición de edificaciones en alta exposición a inundaciones: el caso de Río Frío. 2017



Fuente: Elaboración propia con datos de González et al., 2021, de IGN, 2022, CNE, 2023 y Ministerio de Hacienda, 2021.

Conclusiones

Tal y como se mencionó al inicio, diferentes autores resaltan el impacto económico y no económico de las inundaciones causadas por inundaciones (Aerts et al. 2018; Quesada-Román, 2022). Por ende, el presente trabajo se dio a la tarea de detallar zonas de exposición a inundaciones de las áreas que potencialmente pueden sufrirlas. Con éxito se logró identificar tres zonas donde la exposición a inundaciones puede variar entre baja, media y alta. Corroborando de esta manera, que en el país muchas edificaciones se han construido en zonas de alta exposición a inundaciones. Adicionalmente, la reconstrucción de las edificaciones de 2017 hacia atrás en el tiempo, hasta 1986, ayudó a constatar que el proceso de construcción de edificaciones en zonas potencialmente inundables ha venido en aumento, y se ha realizado principalmente en zonas de exposición media y alta. Lo que confirma lo que varios autores (Arroyo, 2009; Salgado, 2009, Sánchez, 2021; PEN, 2021) afirman de la construcción sin planificación y ordenamiento territorial. Lo que va contra toda política de gestión del riesgo (Bello et al., 2020; CNE,2014).

Desde el punto de vista teórico, la investigación presente se enfocó en la amenaza representada por la capa de áreas inundables de la CNE (2023), y por la exposición abordada por la cercanía a cuerpos de agua y la pendiente donde se localizan las edificaciones. Lo que la metodología muestra es la enorme variabilidad de la exposición que pueda existir dentro de zonas relativamente pequeñas, ya que la pendiente del terreno y la cercanía a cuerpos de agua puede cambiar la exposición a inundaciones en cuestión de metros. Es por eso, que los ejemplos mostrados detallan lo necesario e importante de contar con información detallada espacialmente, para que las autoridades nacionales y locales puedan tener una repuesta más rápida y eficiente ante cualquier amenaza creada por las inundaciones, donde la planificación en base a datos sea la que predomine.

La valoración económica de edificaciones en zonas altamente expuestas a inundaciones muestra lo necesario de la prevención y de la adecuada gestión del territorio. El costo de reponer las edificaciones altamente expuestas puede superar lo que cualquier gobierno destina a la gestión del riesgo, o lo que cualquier gobierno local invierte en infraestructura. Si a esto se le suma la posible pérdida de vidas o lo que la sociedad dura en recuperarse después de una inundación, es cuando la inversión en gestión de eventos vale como prevención de mayores pérdidas en un contexto climático complejo y cambiante. La inversión debería de estar enfocada en reducir la exposición, cuando sea posible, pero también en reducir la vulnerabilidad (CNE, 2014). Aunque en este trabajo no se abordó la vulnerabilidad, este es un tema trascendente y multi-factorial que es urgente de ser abordado, pero que toca muchas dimensiones del desarrollo humano como el social y económico (Quesada-Román, 2022), y que es un tema que queda pendiente para futuras investigaciones que amplíen el trabajo aquí expuesto.

Bibliografía

- Arroyo, L.N. 2009. En Costa Rica: esbozo tipológico y estrategias de mitigación. *Ambientico* (Agosto): 7-11.
- Barrantes, G. y Vargas, J. 2010. La zonificación de amenaza por inundación como herramienta para el ordenamiento territorial en el Valle del Río Sixaola. *Revista Geográfica de América Central* 46: 67-85.
- Bello, O., Bustamante, A. y Pizarro, P. 2020. *Planificación para la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/108), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Brenes, A. 2016. *Gestión del riesgo y vulnerabilidad en Costa Rica*. Ponencia presentada como investigación base para el INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE 2016 (no. 22), Capítulo Armonía con la naturaleza. San José.
- Chuvieco, E. 2010. *Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel.
- Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias. 2014. *Gestión Municipal del riesgo de desastres: Normas y elementos básicos para su inclusión en el ordenamiento territorial: Énfasis en prevención, control y regulación territorial*. San José.

- Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias. 2023. Capa en formato *shape*: Áreas con potencial a Inundación: 1:25.000. San José. https://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full_metadata2?k=Y2FwYW1ldGFkYXRvczo6Y2FwYTo6Q05FOjppbnVuZGFjaW9uZXM=
- Cubero, C. y Carvajal, J.P. 2014. Distribución espacial de las inundaciones en Costa Rica, 10 años de sus efectos. *Revista En Torno a la Prevención* 13: 15-20.
- Decreto Ejecutivo 41960 de 2019 [con fuerza de ley]. Por medio del cual se expide el ESTABLECIMIENTO DE LA METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE USO DE LAS TIERRAS AGROECOLOGICAS DE COSTA RICA. El presidente de la república y los ministros de agricultura y ganadería y de ambiente y energía.
- European Commission (2023). *GHSL Data Package 2023*. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/098587, JRC133256
- González, V., Muñoz, R., Vargas., C. y Durán, E. 2021. *Descripción de cambios de uso del suelo en Costa Rica: 1986-2019*. Ponencia presentada como investigación base para el INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE 2021 (no. 27), Capítulo 4: Armonía con la naturaleza.
- Hernández-Uribe, R.E., Barrios-Piña, H. y Ramírez, H. 2017. Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3: 5-25.
- IGN. 2022. Edificaciones 1:25.000. Consultado el 15-10-2022: <https://www.snitcr.go.cr/Visor/nodos2>.
- IPCC. 2012 *Glossary of terms*. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555-564.
- Ministerio de Hacienda. 2021. Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva. Dirección Órgano de Normalización Técnica. Departamento de Normalización y Sistemas de Información. En *Alcance 213 a la Gaceta 202*, La Gaceta. San José.
- Nawrotski, R., Tebeck, M., Harten, S. y Blankenagel, V. 2023. Climate change vulnerability hotspots in Costa Rica: constructing a sub-national index. *Journal of Environmental Studies and Sciences* (April).
- Neal, J., Keef, C., Bates, P., Beven, K. y Leedal, D. 2013. Probabilistic flood risk mapping including spatial dependence. *Hydrological Processes* 27: 1349-1363.
- Oyedele, P., Kola, E., Olorunfemi, F. y Waltz, Y. (2022). Understanding flood vulnerability in local communities of Kogi State, Nigeria, using an Index-Based approach. *Water* 14 (2746).
- Okazawa, Y., Yeh, P., Kanae, S y Oki, T. 2011. Development of a global flood risk index based on natural and socio-economic factors. *Hydrological Sciences Journal* 56(5): 789-804.
- Programa Estado de la Nación. 2016. *Capítulo Armonía con la Naturaleza*. Programa Estado de la Nación, Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica.
- Programa Estado de la Nación. 2018. *Capítulo Armonía con la Naturaleza*. Programa Estado de la Nación, Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica.
- Programa Estado de la Nación, 2020. *Capítulo Armonía con la Naturaleza*. Programa Estado de la Nación, Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica.

- Programa Estado de la Nación, 2021. *Capítulo Armonía con la Naturaleza*. Programa Estado de la Nación, Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica.
- QGIS Development Team. 2023. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Quesada-Román, A. 2022. Flood risk index development at the municipal level in Costa Rica: A methodological framework. *Environmental Science and Policy* 133: 98-106.
- Salgado, D. 2009. Inundaciones y gestión del riesgo de desastres. Retos para su gestión y mitigación. *Ambientico* (Agosto): 7-11.
- Sanchez, L., Gell, A., Sánchez, L.F. 2018. *Tendencias y patrones del crecimiento urbano en la GAM, implicaciones sociales, económicas y ambientales y desafíos desde el ordenamiento territorial*. Ponencia presentada como investigación base para el Informe Estado De La Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2018 (no. 24), Capítulo 4: Armonía con la naturaleza. San José.
- Sánchez, L. 2021. *Ordenamiento territorial y crecimiento urbano: desafíos e impactos para las ciudades intermedias y la zona marino costera*. Ponencia presentada como investigación base para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021 (no. 27), Capítulo 4: Armonía con la naturaleza. San José.
- Siabato, W. 2018. *La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa*. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28.
- Tecnológico de Costa Rica. 2014. *Atlas de Costa Rica: capa de Ríos. Escala 1:50.000*. Cartago.
- Uribe, E. 2015. *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago. Chile.
- Vargas L., y Madrigal, L. 2022. La inversión pública en infraestructura física en Costa Rica: un análisis con enfoque territorial en la última década. Investigación base para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible número 28.