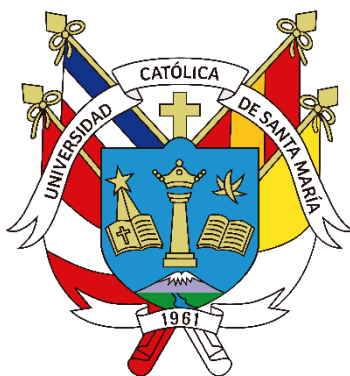


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del
Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**EVALUACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE MITIGACIÓN
DE INUNDACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS MULTITEMPORAL (1984-
2022) EN EL TRAMO URBANO DEL RÍO CHILI – AREQUIPA PARA
LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO**

Tesis presentada por la Bachiller:
Vilca Campana, Karla Maria
para optar el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Asesora:
Mg. Chanove Manrique,
Andrea Marieta

Arequipa- Perú
2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 10 de Diciembre del 2023

Dictamen: 005679-C-EPIA-2023

Visto el borrador del expediente 005679, presentado por:

2016204382 - VILCA CAMPANA KARLA MARIA

Titulado:

**EVALUACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE MITIGACIÓN DE INUNDACIÓN MEDIANTE
ANÁLISIS MULTITEMPORAL (1984-2022) EN EL TRAMO URBANO DEL RÍO CHILI - AREQUIPA
PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29603068 - DELGADO ALVARADO GUSTAVO ALONSO
DICTAMINADOR**



**29611452 - ARENAZAS RODRIGUEZ ARMANDO JACINTO
DICTAMINADOR**



**43606549 - CARDENAS PILLCO BERLY EDINSSON
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE MITIGACIÓN DE INUNDACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS MULTITEMPORAL (1984-2022) EN EL TRAMO URBANO DEL RÍO CHILI - AREQUIPA PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.scielo.org.pe

Fuente de Internet

1%

2

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to Universidad Señor de Sipan

Trabajo del estudiante

1%

5

vdocuments.es

Fuente de Internet

1%

6

www.grade.org.pe

Fuente de Internet

1%

7

aquagestion.blogspot.com

Fuente de Internet

1%

Dedicatoria

A mis abuelitos Francisca, Dorotea, Francisco y Escolástico, quienes fueron mi ejemplo de superación, y a través de su amor y esfuerzo me permitieron acceder a mejores oportunidades. A mis papás, Nicolás Orestes y Ana María, por su amor, guía y apoyo estos años para alcanzar mis objetivos. A mis hermanos José y Nicolás por ser un abrazo fraternal siempre presente. A Raphael, por su amor, creer en mí y motivarme a continuar avanzando.



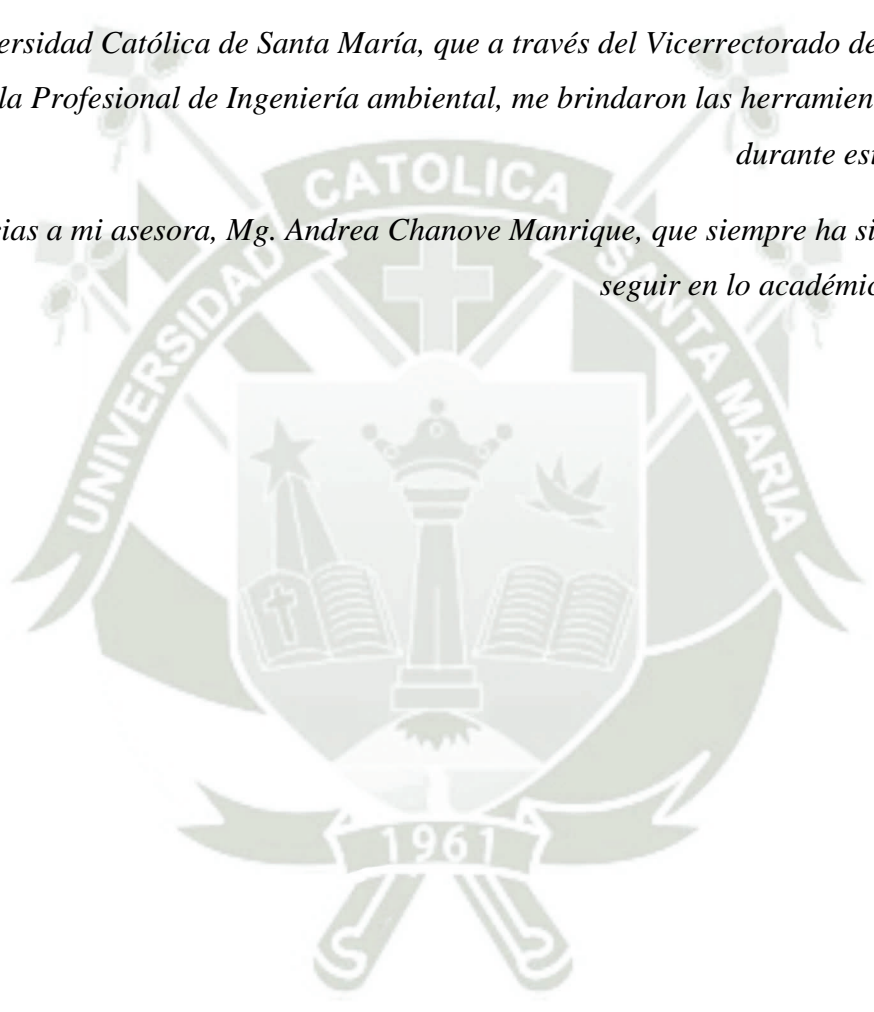
Agradecimiento

A mi familia, especialmente a mis padres, por ser mi fortaleza, gracias por su amor y apoyo en cada paso que doy.

A Andrea, Carla, Berly y Lorenzo, el equipo de Investigación CYTED RUN, por la oportunidad de ser parte de un equipo de gran calidad humana y profesional, y darme su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Católica de Santa María, que a través del Vicerrectorado de Investigación y la Escuela Profesional de Ingeniería ambiental, me brindaron las herramientas y facilidades durante esta investigación.

Gracias a mi asesora, Mg. Andrea Chanove Manrique, que siempre ha sido un ejemplo a seguir en lo académico y profesional.



RESUMEN

Las ciudades se han vuelto más vulnerables a fenómenos hidrometeorológicos extremos, como inundaciones repentinas producto de eventos de precipitación intensos de corta duración. El cambio climático y la disminución de la cubierta verde en el paisaje urbano son las causas del exceso de generación de escorrentía, causando pérdidas económicas e impactos socioambientales negativos. En este escenario los ríos urbanos cumplen un rol protector como infraestructura azul-verde (GBI) que presta gran variedad de servicios ecosistémicos (SE), entre ellos el de control de escorrentía que ayuda en la adaptación frente al cambio climático. Es importante evaluar el impacto de las amenazas urbanas sobre el hábitat de los ríos urbanos y su afectación a este servicio ecosistémico. Se tiene como objetivo la evaluación del servicio ecosistémico de mitigación del riesgo de inundaciones mediante análisis multitemporal (1984-2022) en el tramo urbano del río Chili – Arequipa para la adaptación al cambio climático, aplicando el software InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model).

El modelo requirió como *inputs* imágenes satelitales, la intensidad de precipitación, mapas de uso del suelo y grupo hidrológico de suelo entre los años 1985-2021. Los resultados muestran que el 33.29% de la precipitación es retenida por los espacios verdes y abiertos del tramo urbano del río. El tramo norte presentó mayor variación, con el valor mínimo histórico de 36.9% de retención de escorrentía.

El resultado obtenido constituye una herramienta muy importante para impulsar la conservación de los ríos urbanos como corredores ecológicos y mitigadores de inundaciones urbanas, permitiendo incrementar el nivel de resiliencia de las ciudades.

Palabras clave:

Servicios ecosistémicos, inundaciones urbanas, modelo InVEST

ABSTRACT

Cities have become more vulnerable to extreme hydrometeorological phenomena, such as flash floods resulting from intense precipitation events of short duration. Climate change and the decrease of green cover in the urban landscape are the causes of excess runoff generation, causing economic losses and negative socio-environmental impacts. In this scenario, urban rivers play a protective role as blue-green infrastructure (BGI) that provides a variety of ecosystem services (ES), including runoff control that helps in adapting to climate change. It is important to evaluate the impact of urban hazards on urban river habitat and their effect on this ecosystem service. The objective is to evaluate the ecosystem service of flood risk mitigation through multitemporal analysis (1984-2022) in the urban stretch of the Chili River - Arequipa for adaptation to climate change, applying the InVEST software (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model).

The model required as inputs satellite images, precipitation intensity, land use maps and hydrological soil group between the years 1985-2021. The results show that 33.29% of the precipitation is retained by the green and open spaces of the urban stretch of the river. The northern section presented the greatest variation, with the minimum historical value of 36.9% runoff retention.

The results obtained constitute a very important tool for promoting the conservation of urban rivers as ecological corridors and mitigators of urban flooding, thus increasing the level of resilience of cities.

Key words:

Ecosystem services, urban flooding, InVEST model

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I	14
1 Planteamiento del problema	15
1.1 Problemática	15
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	17
CAPÍTULO II	18
2 Fundamento teórico	19
2.1 Antecedentes de la investigación.....	19
2.2 Marco teórico.....	23
2.2.1 Cambio climático y conceptos	23
2.2.2 Sucesos globales y nacionales de cambio climático	24
2.2.3 Servicios ecosistémicos.....	25
2.2.2 Infraestructura verde-azul y ríos urbanos.....	27
2.2.3 Modelo InVEST de Mitigación de Inundaciones Urbanas	28
CAPÍTULO III	31
3 Metodología	32
3.1 Tipo y Nivel de la investigación.....	32
3.2 Métodos de investigación	32
3.2.1 Área de estudio.....	32
3.2.2 Metodología desarrollada	33
CAPÍTULO IV	39
4 Resultados y discusión	40
4.1 Identificación los servicios ecosistémicos relacionados a la adaptación al cambio climático del tramo urbano del río Chili, Arequipa	40
4.1.1 Selección de SE a evaluar	40
4.1.2 Evaluación de importancia de SE.....	41
4.1.3 Servicios ecosistémicos, infraestructura verde-azul y cambio climático..	44

4.2 Determinación de los <i>inputs</i> para el modelo de mitigación de inundación del software InVEST en el tramo urbano del río Chili, Arequipa	45
4.3 Elaboración de un análisis multitemporal de la variación del servicio ecosistémico de mitigación de inundaciones en el tramo urbano del río Chili, Arequipa.	47
CAPÍTULO V	52
5 Conclusiones y recomendaciones.....	53
5.1 Conclusiones.....	53
5.2 Recomendaciones	54
REFERENCIAS	55
ANEXOS	62
Anexo A – Encuesta de Servicios Ecosistémicos.....	62
Anexo B – Resultados de encuesta Internacional.....	66
Anexo C – Resultados de encuesta Local	68
Anexo D – Validación de capa de uso de suelos.....	70
Anexo E – Capa de HSG.....	71
Anexo F – Vista de <i>inputs</i> al modelo InVEST.....	71
Anexo G – TURNITIN - INFORME DE ORIGINALIDAD.....	72

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de la cuenca urbana del río Chili y los Subtramos definidos.....	33
Figura 2 <i>Inputs</i> para el modelo INVEST	36
Figura 3 Gráfica de medias e intervalos para los resultados de la Evaluación Internacional de 36 SE	42
Figura 4 Gráfica de medias e intervalos para los resultados de la encuesta local de 23 SE	44
Figura 5 Media de precipitación anual para el periodo 1981-2021.....	46
Figura 6 Mapa de uso de suelos para los años 1984, 2004 y 2022	46
Figura 7 Cambio de retención de escorrentía (%) de 1984 a 2022 por subtramo	48
Figura 8 Retención de escorrentía (%) en el área de estudio para el periodo 1984 – 2022.	49
Figura 9 Retención de escorrentía (%) en el Subtramo Periurbano Norte para el periodo 1984 – 2022.....	50
Figura 10 Porcentaje de cambio de uso de suelo de 1984 a 2022.....	50
Figura 11 Vista de capa de grupos hidrológicos de suelos para el área de estudio.....	71
Figura 12 Inputs al modelo InVEST	71

Índice de Tablas

Tabla 1 Tipos de servicios ecosistémicos	26
Tabla 2 Servicios ecosistémicos y cambio climático	35
Tabla 3 Clasificación de Grupos Hidrológicos de suelo según la USDA	37
Tabla 4 Revisión bibliográfica de servicios ecosistémicos asociados a BGI.....	40
Tabla 5 Resultado de ANOVA para los servicios ecosistémicos evaluados en la encuesta internacional	41
Tabla 6 Resultado de ANOVA para los servicios ecosistémicos evaluados en la encuesta local	43
Tabla 7 Servicios ecosistémicos del río Chili asociados a mecanismos de adaptación y mitigación al cambio climático.	44
Tabla 8 Tabla biofísica del año 2022 para el modelo InVEST	47
Tabla 9 Resultados del Modelo de Mitigación del Riesgo de Inundación para cada año.....	48
Tabla 10 Resultados de encuesta de importancia de servicios ecosistémicos a nivel internacional	66
Tabla 11 Resultados de encuesta de importancia de servicios ecosistémicos a nivel local	68
Tabla 12 Resultados de validación de capa de uso de suelos.....	70



INTRODUCCIÓN

Las ciudades son cada vez más vulnerables a fenómenos hidrometeorológicos extremos, como inundaciones repentinas producto de lluvias intensas de corta duración. Estos sucesos se producen inesperadamente en áreas urbanas normalmente no reconocidas como propensas a inundaciones, lo que ocasiona un daño generalizado a la vida y la propiedad (Kumari et al., 2021), obstaculizándose el desarrollo sostenible de la sociedad (Bai et al., 2018). La vulnerabilidad frente a las inundaciones se ha incrementado globalmente debido al cambio climático, cambios en el uso de tierra y el aumento constante de zonas urbanizadas (Kadaverugu et al., 2021; X. Wu et al., 2018). Estudios indican que la morfología urbana redefine el patrón de precipitación local, principalmente debido al efecto isla de calor urbana, carga de aerosoles y a las modificaciones en la estructura de la cobertura verde, lo que conduce a una mayor tasa de flujo máximo de escorrentía a la vez que se limita el agua subterránea y se acelera la erosión del suelo (Hernández-Hernández et al., 2020; Shanableh et al., 2018).

A pesar de que las inundaciones urbanas se han vuelto más frecuentes a nivel mundial; aún se carece de una correcta gestión en las aguas pluviales urbanas (Qi et al., 2020; Rosenzweig et al., 2019). La mayoría de los países desarrollados cuentan con planes urbanos, fondos suficientes y leyes para establecer medidas efectivas de control de inundaciones, mientras que países en vías de desarrollo enfrentan mayores problemas debido a la proliferación de asentamientos informales que muy pocas veces se ajustan a las pautas oficiales de planificación, reglamentos y estándares de construcción (Li et al., 2020).

Actualmente se reconocen dos mecanismos para el control de inundaciones: Medidas de ingeniería y no ingeniería. Las primeras consisten en la construcción de embalses, diques, cuencas de detención, estaciones de bombeo y aliviaderos. Las segundas incluyen la previsión de crecidas, gestión del uso de la tierra, adquisición de tierras y planes de reubicación y recuperación posterior a las inundaciones (X. Wu et al., 2018). Los sistemas de ingeniería convencionales no suelen ser las mejores opciones por el costo y tiempo que demandan (Liu et al., 2020) por lo que las medidas de no ingeniería están tomando relevancia ya que otorgan soluciones socio-ecológicas-tecnológicas que han demostrado ser eficaces en retrasar y reducir la carga de la escorrentía mediante la restauración de la infiltración de agua (Debele et al., 2019), optimizando así el manejo de las aguas pluviales urbanas (Berndtsson et al., 2019);

Pappalardo et al., 2017). Entre las medidas innovadoras relacionadas con el drenaje urbano sostenible (SuDS) destacan: El desarrollo de bajo impacto “Low Impact Development” (LID), medidas naturales de retención de agua, “Natural Water Retention Measures” (NWRM) y soluciones basadas en la naturaleza “Nature-Based Solutions” (NBS) como la infraestructura azul verde “blue green infrastructure” (BGI) (Debele et al., 2019; Quagliolo et al., 2021).

Los ríos urbanos son un ejemplo de BGI, que constituye una conexión biofísica y ecológica importante entre las ciudades y sus ecosistemas circundantes; mantiene la conectividad del paisaje, protege la biodiversidad, presta múltiples servicios ecosistémicos (SE) y constituye una herramienta para la resiliencia de las ciudades a través de la mitigación de inundaciones (Hack et al., 2020; Kadaverugu et al., 2021; Magdaleno et al., 2018; Vásquez, 2016). El mecanismo de biorretención de la BGI se da a través de la absorción del exceso de escorrentía, el cual es infiltrado en los substratos y se fomenta así la recarga de aguas subterráneas (Gurunadha y Surinaidu, 2012). Por lo expuesto, la BGI se considera como una de las principales NBS para lograr los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y hacer frente al cambio climático (Magdaleno et al., 2018).

El Perú es un país en donde las ocurrencias de inundaciones son muy frecuentes – en especial en las zonas norte y sur (Garreaud, 2018) - debido a un ascenso en la media de las precipitaciones causado por el fenómeno del niño (Son et al., 2020); llegando a ocasionarse pérdidas humanas y económicas mayores a los 3 mil millones de dólares (Collyns, 2017).

Arequipa, en el sur del Perú, fue escogida como caso de estudio. La ciudad es parte de la cuenca hidrográfica del río Chili - que atraviesa la urbe de norte a sur -; se localiza entre las regiones naturales de la costa y sierra, y es considerada una región árida, rodeada por volcanes activos. Las precipitaciones generan un drenaje de agua y lodo a través del canal principal del río Chili y otros canales anexos llamados “torreteras”, los cuales provocan inundaciones repentinas en las zonas colindantes, afectando las viviendas e infraestructura del centro histórico (Mazer et al., 2020 y Parida, 2020). Arequipa cuenta con 5 puntos críticos de inundaciones, siendo uno de ellos cercano al tramo urbano del río Chili, por lo que el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres recomienda elaborar evaluaciones de riesgo continuas (CENEPRED, 2022).

La dinámica de la ciudad ha generado un crecimiento urbano no planificado y desordenado, que permite la invasión de los márgenes del río y canales anexos (Son et al., 2020 y Sayers et al., 2018) lo que agudiza los desastres ocasionados cuando se desbordan sus aguas debido a

lluvias intensas. Es evidente que la ciudad enfrenta un desafío en la gestión de aguas pluviales durante eventos de lluvia intensa, lo que evidencia su vulnerabilidad frente al cambio climático (Libélula, C. A. y D. S. A., 2018).

Para la conservación de los ríos como una BGI que permite controlar las inundaciones urbanas, es importante evaluar el impacto de las típicas amenazas sobre la calidad del hábitat (Hack et al., 2020). Para esto se hace uso de estudios geoespaciales y análisis multicriterio de servicios ecosistémicos (Muthusamy seenirajan et al., 2017; Esse, et al. 2019). La aplicación de teledetección, geoprocésamiento y el uso de SIG permiten gestionar una gran gama de información para la planificación y gestión de cuencas hidrográficas (Kharytonov et al., 2018; Volkova et al., 2016; Ganova et al., 2017 Isma'il, et al., 2013; Hack, 2020) y su relación con inundaciones urbanas (R. K. Khanna, et al., 2005). El conocimiento espacial de este tipo de eventos repentinos, como las inundaciones, a través de escenarios de modelado a nivel urbano es todavía un campo bastante inexplorado y prometedor (Kadaverugu et al., 2020). Actualmente el software InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) es un programa de código abierto desarrollado por la Natural Capital Foundation (Sharp et al. 2020) utilizado como herramienta para la definición de estrategias de adaptación frente a inundaciones en zonas urbanas, donde la cuantificación de la escorrentía permite evaluar la vulnerabilidad y el daño a la infraestructura construida del área de estudio (Quagliolo et al., 2021 y Hack et al., 2020). Aunque pocos estudios han reportado aplicaciones del modelo InVEST para la mitigación de inundaciones urbanas (Kadaverugu et al., 2020) son cada vez más los autores que lo aplican (Hamel et al., 2021; Kadaverugu et al., 2021; Quagliolo et al., 2021).

Los estudios realizados en el río Chili se enfocan en el análisis hidrobiológico y conservación del monte ribereño (Montesinos -Tubée et al., 2019). En tramos no urbanos se estudió el ámbito geológico, hidrográfico, bioestratigráfico (Lajo, 2019, Autoridad Nacional del Agua – ANA y Ministerio de Agricultura y Riego del Perú – MINAGRI, 2018). El proyecto PROCHILI (Oficina de Asesoría y consultoría Ambiental / Municipalidad Provincial de Arequipa, 2002) presentó un estudio de planificación urbana para proteger y fomentar la franja ribereña. Ettinger et al. (2016) estudió la inundación repentina ocurrida en Arequipa en el año 2013, utilizando la altura de inundación como indicador de riesgo. No se cuenta con estudios del río bajo el enfoque de servicios ecosistémicos, ni el uso de teledetección y geoprocésamiento con este fin. La presente investigación tiene como objetivo el análisis del servicio ecosistémico de mitigación del riesgo de inundaciones urbanas en el tramo urbano del río Chili, aplicando métodos geoespaciales y modelado con el software InVEST, para estimar la escorrentía debido a las precipitaciones presentadas en el periodo 1985 – 2022.



1 Planteamiento del problema

1.1 Problemática

Se conoce que el cambio climático aumenta la frecuencia de eventos climáticos extremos en las áreas urbanas como: intensidad de olas de calor (IPCC, 2014) el incremento del riesgo de inundaciones urbanas esperado en muchas áreas alrededor del mundo (Alves et al., 2020), entre otros; estos eventos se ven agravados por el aumento rápido de la urbanización (O'Donnell et al., 2020), una mala planificación territorial (Barbosa et al., 2019); y, sumado a ello, una ineficiente gestión hídrica (Torres Paguay, 2018) en los ríos urbanos. Dando como resultado la afectación a los servicios ecosistémicos hídricos. (Martínez, 2019)

Son necesarias alternativas basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático (C. Wu et al., 2019), para lo cual es necesario la incorporación de los servicios de los ecosistemas urbanos en la planificación y gestión urbana; es así que los ríos urbanos, como corredores ecológicos, ofrecen múltiples servicios ecosistémicos y actualmente son vulnerables a los efectos del cambio climático.

La ocupación de espacios vulnerables junto a un crecimiento poblacional desordenado, hacen de nuestra ciudad vulnerable a estos eventos climatológicos ya que en zonas semi-áridas como Arequipa, es común que las inundaciones, a pesar de su poca frecuencia, causen destrucción (Rivera et al., 2018). Además de ello, los sectores de recursos hídricos y cuencas y actividades económicas se encuentran catalogados como vulnerables al cambio climático (UNFCCC & MINAM, 2016); la cuenca del río Chili se ve afectada por cambios climatológicos asociados a una mayor densidad poblacional y mayor demanda de recursos. (Gutarra, 2019)

El río Chili en Arequipa es una zona de amortiguamiento frente a los impactos ambientales generados por la urbanización; sin embargo, en la actualidad existe una pérdida de la conectividad paisajística ribereña en el tramo de la cuenca urbana del mismo

1.2 Justificación

Los ríos urbanos son corredores ecológicos que actúan como amortiguadores naturales gracias a los múltiples servicios ecosistémicos (SE) que ofrecen; son una herramienta no solo para organizar el territorio y conectar ecosistemas; sino también para enfrentar al

cambio climático debido a su potencial para mitigar problemas ambientales y reducir la vulnerabilidad a través de procesos naturales (Karis & Ferraro, 2017; Vásquez, 2016).

La ciudad de Arequipa cuenta con el tramo urbano del río Chili; colindando con infraestructura urbana, histórica y natural como la campiña. Su cuenca provee de agua urbana y rural, y permite actividades energéticas y agrícolas (MPA, 2002). A pesar de su valor ambiental, paisajístico, cultural y recreativo; existe una pérdida paulatina del corredor ecológico del río debido a fenómenos ambientales y alteraciones antrópicas (Zeballos, 2020) que han afectado los servicios ecosistémicos que provee. En la actualidad, existen estudios orientados a la contaminación de sus aguas; aspectos fisicoquímicos, hidrobiológicos y de biodiversidad. Sin embargo, se tiene una visión sesgada de la problemática del río, lo cual no permite crear soluciones integrales para su recuperación (Ojeda, 2017). Además de ello, son necesarios estudios en base a los servicios ecosistémicos provistos por las infraestructuras azul-verde, ya que en la actualidad es baja o nula la investigación sobre este tema a nivel América Latina (Romero-Duque et al., 2020); de tal forma que se propicie una gestión basada en ecosistemas.

Dado esto, el presente trabajo de investigación plantea un enfoque innovador basado en la evaluación de los servicios ecosistémicos que ofrece el río Chili en su tramo urbano, aplicando monitoreo remoto haciendo uso de teledetección y geoprocesamiento. La investigación contribuiría a formar una visión holística de la problemática del tramo urbano del río Chili, dando a conocer el estado actual del servicio ecosistémico de mitigación de inundación. Finalmente, se demostraría el valor del Chili como estrategia para la adaptación al cambio climático gracias a este servicio ecosistémico, lo que tendría impacto directo en la planificación territorial, gestión y desarrollo socioambiental de Arequipa como ciudad resiliente y sostenible.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el servicio ecosistémico de mitigación de riesgo de inundación mediante análisis multitemporal (1984-2022) en el tramo urbano del río Chili – Arequipa para la adaptación al cambio climático.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los servicios ecosistémicos relacionados a la adaptación al cambio climático del tramo urbano del río Chili, Arequipa
- Determinar los *inputs* para el modelo de mitigación de inundación del software InVEST en el tramo urbano del río Chili, Arequipa
- Realizar un análisis multitemporal de la variación del servicio ecosistémico de mitigación de inundaciones en el tramo urbano del río Chili, Arequipa.





2 Fundamento teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

Se tienen estudios que abarcan la relación entre las infraestructuras verde-azul y los servicios ecosistémicos que estos proveen, así como las consecuencias de su afectación en áreas urbanas.

Vásquez (2016) en el estudio del caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile, discute los argumentos a favor de la infraestructura verde urbana y la provisión de servicios ecosistémicos como componentes claves de sistemas urbano-ecológicos resilientes ante al cambio climático. Además, discutiendo el aporte del corredor ribereño del río Mapocho en la actualidad y su potencial para enfrentar el cambio climático a través de los servicios ecosistémicos claves: efecto enfriador, ruta para transporte no motorizado y mitigación de inundaciones; concluyendo en que el desarrollo de un corredor verde ribereño en el río Mapocho puede contribuir a la provisión de los tres servicios ecosistémicos evaluados y de esta forma constituir parte de un sistema de infraestructura verde en Santiago para mitigar y adaptarse al cambio climático. Como parte de la metodología para la selección de servicios ecosistémicos a evaluar, se realizó una revisión de literatura y se elaboró una lista de servicios ecosistémicos que luego fue presentada frente a un panel de expertos y actores locales para seleccionar los más relevantes y necesarios para la ciudad.

Como parte de Natural Capital Project (Sharp et al., 2019), se desarrolló el software InVEST, una herramienta para explorar la manera en que los cambios en los ecosistemas pueden conducir a cambios en los beneficios que fluyen hacia las personas. Es así el conjunto de herramientas del software, se describen en la guía junto a los modelos para cuantificar, mapear y valorar los beneficios proporcionados por los sistemas terrestres, de agua dulce y marino; agrupando los modelos en servicios de apoyo, servicios finales, herramientas para facilitar los análisis de servicios ecosistémicos y herramientas de apoyo. Las herramientas de apoyo incluyen ayudar a crear cuencas hidrográficas, realizar el procesamiento hidrológico en un modelo de elevación digital y crear escenarios que se pueden usar como entradas para InVEST.

En la investigación de Cárdenas Álvarez (2016), aplicabilidad del software InVEST para mapeo de servicios ecosistémicos, buscó generar mapas y modelos utilizando el software

INVEST, compuestos por los servicios ecosistémicos a evaluar; los mapas generaron fueron en relación a almacenamiento actual de carbono, rendimiento hídrico y degradación de la calidad de hábitat. Es así que, la aplicación del software el deterioro de los servicios ecosistémicos prestados por el área de estudio y el año en el que tuvo mayor valor para la comunidad, junto a la afectación actual. Por lo tanto, la investigación permite saber que es viable la evaluación de los servicios ecosistémicos a través del software y uso de imágenes satelitales.

Asimismo, en la investigación de Quagliolo et al. (2021), se observa la aplicabilidad del modelo de mitigación de inundación urbana para tres territorios costeros urbanos de la región de Liguria (Italia), estimando adecuadamente la cantidad de escorrentía debido a eventos de precipitación para la cuenca. Estos resultados ayudaron a definir las Medidas de Retención Natural del Agua (NWRM) por tipo de uso del suelo como soluciones resilientes al abordar la reducción de la escorrentía específica del lugar.

Por otro lado, en la investigación de Yang et al. (2020) se analizó la relación entre la temperatura superficial y la infraestructura azul verde, junto a los servicios ecosistémicos que se proveen y la prioridad que tienen estas infraestructuras en frente a la adaptación al cambio climático para ciudades de gran altitud. La investigación concluye que la relación entre la temperatura superficial y los índices de vegetación y agua, son inversamente proporcionales, entendiendo así el efecto de reducción de temperaturas gracias a las infraestructuras o espacios azul-verde.

Asimismo, O'Donnell et al. (2020) investigó el uso y generación de herramientas espaciales de mapeo para la gestión de sistemas de manejo de inundaciones basados en la infraestructura verde y azul disponible, donde se determina a través de estas herramientas la prioridad de intervención y la oportunidad de interoperabilidad, ayudando a la toma de decisiones para la generación de estrategias. Se concluye la importancia de la integración entre las infraestructuras verdes y azules junto a otras infraestructuras urbanas, generando sistemas interoperables entre estas infraestructuras azul-verde, y cómo la transición a ciudades resilientes frente a inundaciones necesita sistemas integrados a las BGI.

En cuanto a antecedentes locales, en el estudio “Desafíos relacionados con el agua en el nexo de gobernanza para el desarrollo sostenible: perspectivas de la ciudad de Arequipa, Perú” (Salmoral et al., 2020), se analizan cómo los impactos ambientales negativos se encuentran en aumento debido a las presiones de una población urbana en crecimiento y la

competencia por los recursos naturales. Dentro del estudio, se abordan las percepciones de las partes interesadas dentro del contexto de gestión integrada de recursos naturales, enfocado al agua, y los desafíos ambientales, socioeconómicos y de gobernanza que limitan el logro de los objetivos de desarrollo sostenible. El análisis se llevó a cabo en Arequipa, considerada una región dinámica sujeta a niveles extremos de estrés hídrico; teniendo como resultado la necesidad de promover la adaptación en la gestión del agua y la tierra, debido a los impactos percibidos de eventos climáticos extremos, crecimiento de la población urbana y el aumento de la demanda sectorial del agua.

En el estudio Hidrogeológico del acuífero del Río Chili (ANA, 2018) evaluó el recurso hídrico almacenado en el acuífero Chili, características y condiciones hidrogeológicas de los componentes tanto de los depósitos no consolidados (suelos) como consolidados (afloramientos rocosos) comprendidos dentro de la cuenca del río Chili. Se determinó la calidad del recurso hídrico subterráneo, así como las reservas almacenadas en el acuífero.

El Plan Director de Arequipa Metropolitana (MPA, 2002), propuso al río Chili como área de preservación y conservación ambiental luego de la declaratoria como Patrimonio Mundial por la UNESCO, además de ello, define la cuenca hidrográfica Quilca – Chili como vulnerable a los efectos de la desertificación. Por otro lado, define a la cuenca como única fuente de agua dulce disponible para las actividades económicas, sociales y urbanas de la ciudad. Dentro de los principales usos del recurso hídrico, se define el uso urbano de la ciudad de Arequipa, necesidades agrícolas, producción de energía, además de usos industriales y mineros. Es así que, como parte de la problemática de la desertificación en el sistema hídrico del Chili, se observa la importancia de la conservación del recurso hídrico en el ámbito local y regional, sin el cual sería insostenible la vida natural y urbana de la ciudad y los centros poblados ubicados dentro de su área de influencia.

El Proyecto PROCHILI (Plan de Gestión Ambiental de la Cuenca Metropolitana del río Chili) (Programa APGEP-SENREM, 2002) es un estudio de planificación urbana que estipula medidas de protección y fomento de la franja ribereña. Buscó diagnosticar e identificar las prioridades en la cuenca, asimismo, generar políticas, programas y proyectos; teniendo como resultado el Plan Maestro de Desarrollo Sustentable. En este estudio, se define al río como un elemento trascendental en la vida y el desarrollo de grupos humanos asentados en sus riberas, así como para el desarrollo económico y social de los mismos. Se define el tramo urbano del río Chili con una longitud de 8km, desde su

límite norte en Chilina y su límite sur en el Balneario de Tingo. Se identifica a la cuenca y el valle del río como un macrorecurso estratégico para la ciudad, sin embargo, el cual se encuentra amenazado por los procesos caóticos de expansión urbana, causando un deterioro de los ecosistemas naturales y agroproductivos, además de una fuerte contaminación de las aguas del río. Por otro lado, la poca conciencia de las autoridades y pobladores para aprovechar convenientemente los recursos del río contribuye a un deterioro sistemático en un tiempo relativamente corto, teniendo a su vez impacto en la flora y fauna endémica, y el incremento de problemas de salud pública.

Montesinos et al. (2019) estudiaron la biodiversidad florística del monte ribereño del río Chili a lo largo del cauce que atraviesa la ciudad de Arequipa, donde se identificaron 245 especies de flora. Asimismo, se realizó una evaluación de tendencia en caso de inundación por aumento de caudal del río y cuán afectado podría verse el monte ribereño, como lo ocurrido en los años 1989, 1999 y 2012. Finalmente, sugiere la preservación de los sistemas fluviales y terrestres coexistentes en el tramo urbano, conllevado con un desarrollo sostenible para mejorar la calidad de vida de los habitantes.

El estudio de la gestión integrada de la sub cuenca Oriental del Río Chili, Mollebaya – Piaca, Región Arequipa (Lajo, 2019) se orientó a la caracterización de la problemática que viene atravesando este espacio geográfico y, a las posibilidades de mejoramiento de la calidad de vida de sus poblaciones a través de un plan de gestión integrada como corresponde al enfoque específico de la actualmente denominada Geografía Ambiental. Para lo cual se analizó información relacionada al paisaje geográfico, aspectos hidrológicos, geológicos, biológicos, turísticos, así como algunos aspectos de riego, sociales y potencialidades. La investigación buscó dar una visión clara del estado actual en la que se encuentran los recursos geográficos de la subcuenca del río del Río Mollebaya – Piaca, dentro de la subcuenca oriental de Arequipa.

En cuanto a otros estudios relacionados a servicios ecosistémicos cercanos al área de estudio, se encuentra el estudio de Loyola et al. (2008), donde se buscó la valoración del servicio ambiental de provisión de agua con base en la Reserva Nacional Salinas y Aguada Blanca, el cual presentó el diseño de una experiencia piloto de pago por servicios ambientales por parte de los demandantes del recurso hídrico, de forma en la que se generen actividades productivas sostenibles a favor de la conservación de los ecosistemas y servicios que provee la cuenca.

Los estudios realizados en el río se enfocan en el análisis hidrobiológico y conservación del monte ribereño, así como la evaluación de inundaciones (Montesinos-Tubée, 2019). En tramos no urbanos se estudió el ámbito geológico, hidrográfico, bioestratigráfico (ANA, 2018; Lajo, 2019). No existen estudios del río Chili bajo el enfoque de servicios ecosistémicos, ni el uso de teledetección y geoprocusamiento

2.2 Marco teórico

2.2.1 Cambio climático y conceptos

2.2.1.1 Cambio climático

Se entiende como cambio climático al cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que produce una variación en la composición de la atmósfera global y que suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. (IPCC, 2014)

2.2.1.1 Vulnerabilidad y resiliencia

Vulnerabilidad es la propensión o predisposición por verse afectado negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos, incluida la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse. (IPCC, 2014)

Por otro lado, se entiende como resiliencia a la capacidad de un ecosistema de retornar a sus condiciones originales o reorganizarse luego de un proceso de disturbio, es así que las técnicas de gestión adaptativa del agua, incluida la planificación de escenarios, los enfoques basados en el aprendizaje y las soluciones flexibles y de bajo arrepentimiento, pueden ayudar a crear resiliencia a los cambios e impactos hidrológicos inciertos debido al cambio climático. (IPCC, 2014)

2.2.1.2 Adaptación, mitigación y desarrollo sostenible

La mitigación y adaptación representan actividades que apuntan a atacar las causas y consecuencias del cambio climático respectivamente. Es decir, por un lado, la mitigación apunta a reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (o incrementar sumideros), que producen un problema global; y, por otro lado, la adaptación se orienta a establecer acciones para un desarrollo resiliente al clima, atendiendo los impactos locales.

Se puede decir que la mitigación es importante para el desarrollo sostenible desde dos perspectivas. La primera, al reducir la tasa y magnitud del cambio climático, lo que reduce las

tensiones relacionadas al clima en el desarrollo sostenible, incluyendo los efectos de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. En segundo lugar, a través de las trayectorias de cambio tecnológico e institucional para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero que interactúan con las vías o planes de desarrollo. (Denton et al., 2015)

Por otro lado, la adaptación climática también se encuentra vinculada estrechamente al desarrollo sostenible; primeramente, muchos de los determinantes de la capacidad de adaptación para responder al impacto climático y los indicadores de desarrollo sostenible se superponen; en segundo lugar, el desarrollo de capacidades de adaptación puede contribuir de manera crítica al bienestar de los sistemas sociales y ecológicos; finalmente, la creación de capacidad de adaptación dentro de un marco de desarrollo sostenible puede requerir cambios transformacionales. (Denton et al., 2015)

2.2.2 Sucesos globales y nacionales de cambio climático

2.2.2.1 Causas a nivel global

En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y en todos los océanos. La influencia humana ha generado el calentamiento del clima a un ritmo sin precedentes en los últimos 2000 años. (IPCC, 2021)

Investigaciones califican a su comportamiento como autoacelerado, pues debido a los referidos efectos en el planeta, se produce un aporte mayor de gases de efecto invernadero (GEI); de este modo, se tienen repercusiones en la intensidad de esta anomalía. Es así que es indiscutible que nuestras actividades están provocando el cambio climático. (IPCC, 2021)

2.2.2.2 Consecuencias a nivel global

Los impactos de los extremos recientes relacionados con el clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales revelan una vulnerabilidad y exposición significativas de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la variabilidad climática actual. Los impactos de tales extremos relacionados con el clima incluyen la alteración de los ecosistemas, la interrupción de la producción de alimentos y el suministro de agua, daños a la infraestructura y los asentamientos, morbilidad y mortalidad, y consecuencias para la salud mental y el bienestar humano. Para los países en todos los niveles de desarrollo, estos impactos son consistentes con una falta significativa de preparación para la variabilidad climática actual en algunos sectores (IPCC, 2014), es así que este cambio inducido por el

hombre ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. La evidencia de estos cambios y su atribución a la influencia humana se ha visto fortalecido desde el último reporte. (IPCC, 2021)

Los peligros relacionados con el clima exacerbaban otros factores de estrés, a menudo con resultados negativos para los medios de vida, especialmente para las personas que viven en la pobreza. Los peligros relacionados con el clima afectan la vida de las personas pobres directamente a través de impactos en los medios de vida, reducciones en el rendimiento de los cultivos o destrucción de hogares e indirectamente a través, por ejemplo, del aumento de los precios de los alimentos y la inseguridad alimentaria. (IPCC, 2014)

2.2.2.3 Cambio climático en Perú: Vulnerabilidad y resiliencia

De acuerdo con la convención de las naciones unidas sobre el cambio climático de 1992, el Perú es considerado un país vulnerable ante el cambio climático. En este entender, posee siete de las nueve características que determinan el grado de vulnerabilidad, las cuales comprenden: “(1) zonas costeras bajas, (2) zonas áridas y semiáridas, zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal, (3) zonas expuestas a inundaciones, sequías y desertificación, (4) zonas propensas a los desastres naturales, (5) ser un país en desarrollo con ecosistemas montañosos frágiles; los países con zonas de ecosistemas frágiles, incluidos los ecosistemas montañosos, (6) ser un país con zonas de alta contaminación atmosférica urbana y (7) ser un país cuya economía dependa en gran medida de los ingresos generados por la producción, el procesamiento y la exportación de combustibles fósiles y productos asociados de energía intensiva, o de su consumo” (Pulgar-Vidal, 2010)

Asimismo, las ciudades, por su propia naturaleza, concentran a las personas y sus hogares, capital físico, industrias y desechos. Esto puede convertirlos en lugares muy peligrosos para vivir y trabajar y hacer que sus poblaciones sean muy vulnerables a eventos climáticos extremos u otros eventos físicos que tienen el potencial de ser desastres. Sin embargo, esto no como algo inherente a las ciudades, sino como el producto de una planificación y gobernanza inadecuadas. (Satterthwaite et al., 2007)

2.2.3 Servicios ecosistémicos

2.2.3.1 Capital Natural

El capital natural es la reserva o stock de recursos naturales renovables y no renovables, reserva de componentes de los ecosistemas, los procesos e interacciones que determinan su

integridad, rendimiento y resiliencia; que se combinan para producir un flujo de beneficios o servicios para la sociedad. (Natural Capital Coalition, 2018)

2.2.3.2 Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son aquellos beneficios económicos, sociales y ambientales, directos e indirectos, que las personas obtienen del buen funcionamiento de los ecosistemas (Ley de Mecanismos de Retribución Por Servicios Ecosistémicos, 2014) . Alimento, materias primas y agua dulce son varios de los beneficios que las personas han sabido aprovechar de la naturaleza de manera directa; por otra parte, beneficios indirectos se pueden considerar a los ciclos de nutrientes, regulación climática y formación de suelos.

Se agrupan los servicios ecosistémicos (SE) en cuatro tipos: 1) de provisión, 2) de regulación, 3) culturales, y, 4) de soporte.

Tabla 1 Tipos de servicios ecosistémicos

Tipo de servicio	Definición	Ejemplo de SE
Servicios de provisión (suministro)	Son los beneficios que se obtienen de los bienes y servicios que las personas reciben directamente de los ecosistemas.	<ul style="list-style-type: none"> • Alimento • Fibra • Recursos genéticos • Combustibles • Agua • Productos bioquímicos, medicinas naturales.
Servicios de regulación	Son los beneficios que se obtienen de la regulación de los procesos de los ecosistemas.	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación de la calidad del aire • Regulación del clima • Regulación hídrica • Control de la erosión • Regulación de riesgos naturales • Secuestro de carbono
Servicios Culturales	Son los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas.	<ul style="list-style-type: none"> • Valores espirituales y religiosos. • Belleza paisajística. • Recreación y ecoturismo.
Servicios de soporte	Son los servicios necesarios para producir los otros servicios ecosistémicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo de nutrientes • Formación de suelos • Mantenimiento de la biodiversidad.

Fuente: Elaboración propia en base al Ministerio del Ambiente (2016).

Los servicios ecosistémicos dependen de las funciones ecosistémicas, las cuales se refieren a la capacidad que tienen los ecosistemas para proporcionar los SE. Entre las principales funciones están la producción primaria neta de biomasa vegetal o animal, el ciclo hidrológico,

la formación de suelo y el control biológico. Esta capacidad está basada en las interacciones entre la estructura biofísica de los ecosistemas (sus componentes) y los cambios o reacciones que ocurren dentro de estos, así como de los procesos (físicos, químicos o biológicos) que incluyen la descomposición, la producción, el ciclo de nutrientes y los flujos de nutrientes o energía. Una o varias funciones ecosistémicas pueden ser generadoras de un servicio ecosistémico, tales como la regulación climática o la disponibilidad del agua (Costanza et al., 1997).

2.2.1.2 Degradación de ecosistemas

Se entiende por ecosistema al complejo dinámico de comunidades de seres vivos y seres inertes, interactuando unos con otros como una unidad funcional (Valverde et al., 2005). Es así que, la degradación de ecosistemas se entiende como la pérdida total o parcial de alguno de los factores de producción (componentes esenciales) que altera la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, disminuyendo por tanto su capacidad de proveer bienes y servicios (DGIP-MEF, 2015).

2.2.2 Infraestructura verde-azul y ríos urbanos

2.2.2.1 Infraestructura verde-azul

El concepto de "infraestructura azul-verde" se propuso en los Estados Unidos durante la década de 1990 para ser utilizado en la planificación urbana, lo que sugirió que la infraestructura azul-verde podría planificarse y organizarse como parte de la planificación urbana.

Las infraestructuras azul-verde tienen la misma importancia que las infraestructuras de construcción en la ciudad. La infraestructura "azul" incluye lagos, embalses, ríos y otros cuerpos de agua, y la infraestructura "verde" incluye bosques, céspedes, parques, techos verdes y otras áreas. Debido a que la capacidad calorífica del agua es mucho mayor que la del aire, la vegetación absorbe directamente la luz y el calor, y el calor se disipa por evaporación y transpiración. Las infraestructuras azul-verde se han convertido en "fuentes frías" en las ciudades. (D. Wu et al., 2018)

Como se mencionó anteriormente las ciudades y áreas urbanas enfrentan diversos desafíos a causa del cambio climático; en respuesta a estos desafíos, se ha dirigido la atención hacia la aplicación de materiales refrigerantes para reducir el almacenamiento de calor y la absorción de la radiación solar (aumentando el albedo de las ciudades) y la planificación del espacio o

infraestructuras azul-verde para paliar algunos de estos efectos. El espacio verde azul urbano se define como aquel que contiene tanto vegetación verde urbana como cuerpos de agua, que se pueden resumir como infraestructura verde urbana. Sin embargo, muchos estudios afirmaron que el desarrollo de espacios verdes azules urbanos puede ser una mejor solución que los materiales refrigerantes porque los espacios verdes azules urbanos son rentables, amigables con el medio ambiente y políticamente aceptables (Yang et al., 2020).

2.2.2.2 Ríos urbanos

La comprensión de un río urbano es intuitiva; pero su definición formal es compleja. Existen numerosos conceptos de “río” recogidos por diversos autores; pero la mayoría de ellos no consideran la complejidad de su significado. Genéricamente, los ríos se definen como “corrientes de agua dulce que fluyen de manera continua, más o menos caudalosa; desembocando en otro cuerpo de agua”(Durán Vian et al., 2020).

Una mirada holística nos permite entender al río como un “territorio fluvial” (Horacio, 2015) es decir un ecosistema complejo que incluye el cauce, las riberas y las llanuras de inundación, de manera que se entiende como un conjunto de espacios conectados entre sí. Actualmente los ríos o corredores ecológicos ribereños son llamados “infraestructura azul-verde” (BGI) y diversos estudios han comprobado su ayuda a enfrentar el cambio climático aumentando los niveles globales de resiliencia del sistema urbano y brindando servicios ecosistémicos de gran valor (Magdaleno, 2016).

Respecto a la definición de “río urbano”, González (2017) indica que el espacio fluvial urbano queda definido por “el cauce del río u obra de protección, sus márgenes y el entorno inmediato que permite caracterizar las relaciones río-ciudad”. Durán Vian et al. (2020) indican que “un río podría ser urbano si la dinámica de este está afectada por la ciudad. Dicho de otra manera, un tramo urbano sería aquel que presenta usos del suelo urbanos en toda o parte de su llanura de inundación”.

2.2.3 Modelo InVEST de Mitigación de Inundaciones Urbanas

El Modelo de Mitigación de Inundaciones Urbanas es un modelo reciente (2019) del software InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) versión 3.8.6 añadido a las herramientas de Natural Capital Project, un proyecto de la universidad de Stanford (Sharp et al., 2019).

En particular, este modelo considera la influencia de la huella edificada y los usos de tierra en los diferentes tipos de servicios ecosistémicos prestados por el Capital Natural, tales como las infraestructuras verde-azules, en el contexto urbano. Este modelo se centra en la capacidad de las ciudades para reducir el proceso de escorrentía debido a los eventos de precipitación, limitando las posibles inundaciones. Como modelización hidrológica, este modelo InVEST tiene en cuenta la precipitación dentro de una cuenca hidrográfica como entrada para estimar la descarga de escorrentía resultante de una cuenca (Quagliolo et al., 2021).

Dado que las infraestructuras naturales desempeñan un papel crucial en la reducción de las inundaciones, este modelo tiene en cuenta el potencial de las zonas verdes permeables para reducir la escorrentía, ralentizando los flujos superficiales y creando espacio para el agua (como en las llanuras aluviales o las cuencas). La hipótesis principal del modelo tiene en cuenta las zonas propensas a las inundaciones debido a la interacción entre las capas superficiales permeables e impermeables (es decir, el tipo de uso del suelo) y el drenaje del suelo (en función de las características del suelo), que genera la escorrentía superficial en caso de precipitación. Para cada píxel, la salida del modelo representa la reducción de la escorrentía (es decir, la cantidad retenida por píxel en comparación con los volúmenes de precipitación) (Sharp et al., 2019).

Los *inputs* requeridos para el modelo (Sharp et al., 2019):

- **Área de interés:** Un mapa del área sobre las que se trabajaran los resultados finales. Pueden ser límites de cuencas hidrográficas o de alcantarillado.
- **Profundidad de la precipitación:** Profundidad de la precipitación en milímetros para el de diseño del evento de precipitación de interés.
- **Uso de suelos:** Mapa de uso de suelos (*Land Use/Land Cover* o LULC por sus siglas en inglés). Todos los valores de este ráster deben tener los *inputs* correspondientes en la tabla biofísica. Todos los resultados se producirán con la resolución de este ráster.
- **Soil Hydrologic Group:** Mapa de los grupos hidrológicos del suelo. Los píxeles pueden tener los valores 1, 2, 3 o 4, correspondientes a los grupos hidrológicos de suelo A, B, C o D, respectivamente.
- **Tabla Biofísica:** Tabla de datos del número de curva para cada clase LULC. Todos los códigos LULC en el ráster LULC deben tener los *inputs* correspondientes en esta tabla para cada grupo de suelos.

Los principales resultados del modelo son:

- **Retención de escorrentía:** Ráster con los valores de retención de la escorrentía (relativo al volumen de precipitación).
- **Retención de escorrentía:** Ráster con los valores de retención de escorrentía en m^3 .
- **Escorrentía:** Ráster con valores de escorrentía (mm).





3 Metodología

3.1 Tipo y Nivel de la investigación

Investigación es de tipo descriptivo-cuantitativa

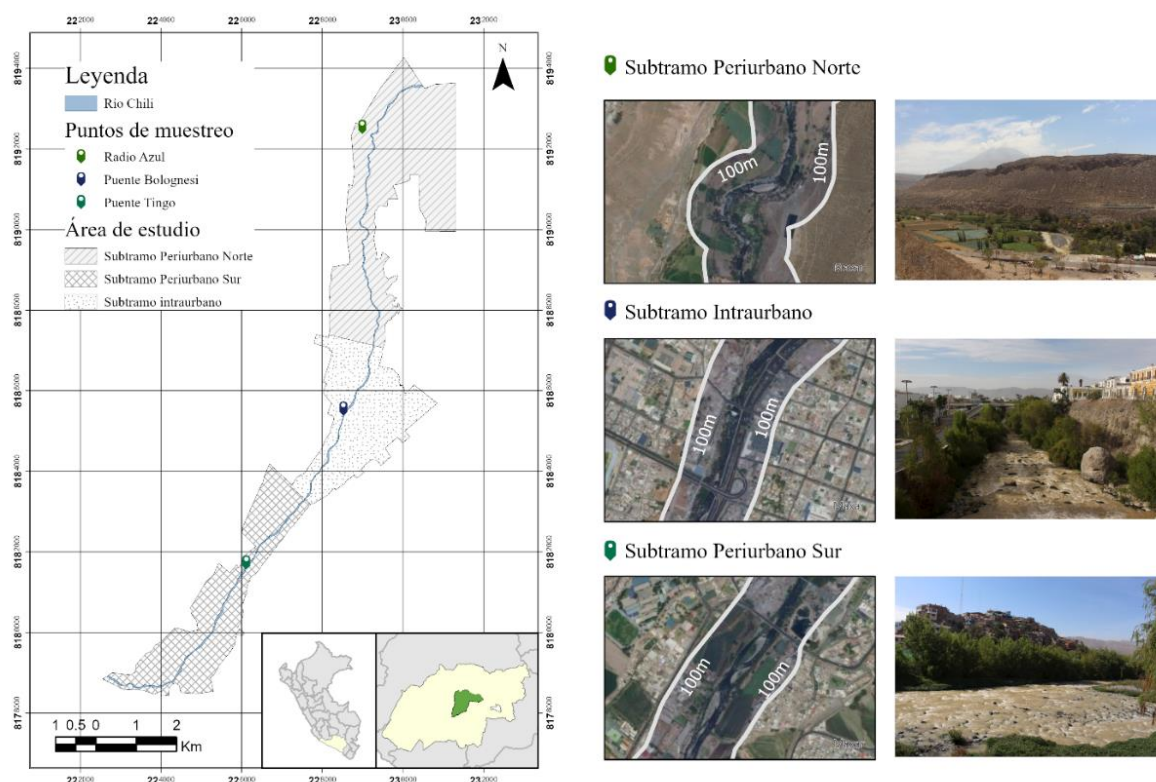
3.2 Métodos de investigación

3.2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra definida por el área urbana y periurbana alrededor del río Chili (Figura 1), la cual se encuentra conformada por el área ribereña y sector residencial, con la presencia de áreas verdes a lo largo del corredor ribereño. En el estudio de Iruri et al., (2022), se identificaron tres subtramos como parte del tramo urbano del río Chili. El primer tramo se encuentra delimitado desde el Santuario Virgen de Chapi – Charcani hasta el puente Chilina, considerándose el subtramo periurbano norte. El segundo tramo, desde el mismo punto hasta llegar al puente San Isidro, se considera el subtramo intraurbano, al presentar usos urbanos a ambas márgenes del río. El tercer tramo, se encuentra delimitado hacia el sur hasta el puente Congata, donde se presenta un uso urbano en al menos uno de los márgenes del río de forma intermitente, considerándose el subtramo periurbano sur (Figura 1).

Este tramo se definió en base a la metodología de Durán Vian et al., 2020, y el Plan de Desarrollo Metropolitano como la cuenca Urbana del Río Chili, atravesando el centro histórico (Instituto Municipal de Planeamiento, 2016). Esta área de estudio será la base para los *inputs* del modelo de los servicios ecosistémicos y su análisis a través de la herramienta InVEST.

Figura 1 Mapa de la cuenca urbana del río Chili y los Subtramos definidos



Fuente: Iruri, et al. (2022)

3.2.2 Metodología desarrollada

3.2.2.1 Identificación los servicios ecosistémicos relacionados a la adaptación al cambio climático del tramo urbano del río Chili, Arequipa

3.2.2.1.1 Selección de SE a evaluar

Para la identificación de servicios ecosistémicos, se realizó una revisión bibliográfica para identificar los SE a evaluar en las encuestas, con el fin de seleccionar la mayor cantidad posible de SE característicos de los ríos mencionados por distintos autores. Esta revisión fue realizada utilizando una cadena de búsqueda, utilizando como palabras clave “servicios ecosistémicos”, “infraestructura azul-verde” y “ríos urbanos”, donde se consideraron 14 documentos entre artículos, libros y reportes. Debido a que la infraestructura verde no es un tema relativamente nuevo, la metodología de este trabajo excluyó los estudios que solo consideraron SE de infraestructura verde sin una medida de infraestructura azul.

3.2.2.1.2 Evaluación de importancia de SE

Se elaboró dos encuestas en escala de Likert (Andrade et al., 2017) para evaluar la percepción de 32 expertos internacionales respecto a la importancia de los SE de los ríos urbanos, y a partir de estos resultados, se elaboró una segunda evaluación de percepción a 20 expertos locales en materia de gestión hídrica relacionados al río Chili y de esta forma poder seleccionar los SE más importantes en base a los resultados. La escala se construyó del 1 al 5 donde 1 es No importante y 5 es Muy importante. Para seleccionar los SE en cada evaluación se consideró aquellos que obtuvieron un valor promedio mayor o igual a 4 en esta escala. (Martínez-Martínez et al., 2022). Se anexa la encuesta aplicada en el Anexo A – Encuesta de Servicios Ecosistémicos.

Una vez obtenidos los resultados de la encuesta internacional y local se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) y la comparación en parejas de Tukey (Casado, et al., 2013) en el software Minitab 19 para las medias de las valoraciones de importancia de los SE según la escala de Likert y así poder filtrar los SE que tengan medias promedio significativamente superiores o iguales a 4 (Martínez-Martínez et al., 2022) con el fin de que estos se evalúen en la encuesta local aplicando el mismo procedimiento.

3.2.2.1.3 Servicios ecosistémicos, infraestructura verde-azul y cambio climático

Se conoce que la infraestructura azul-verde puede ayudar a enfrentar el cambio climático, a través de la provisión de SE (Gill et al., 2018). El cambio climático debe ser abordado a través de mecanismos de mitigación y adaptación que logren mejorar la resiliencia frente a peligros climáticos (Cavan et al., 2021). Se entiende la adaptación al cambio climático es el proceso de ajuste al cambio actual o futuro en el clima y sus efectos; reduciendo vulnerabilidad frente a estos efectos peligrosos; por otro lado, la mitigación al cambio climático se asocia a los esfuerzos por disminuir la emisión actual y futura de gases de efecto invernadero, con la finalidad de disminuir la tasa y magnitud del calentamiento, aumentando el tiempo disponible para lograr la adaptación al cambio climático. (IPCC, 2014)

En base a una revisión bibliográfica (Tabla 2), se asociaron los SE provistos por la infraestructura azul-verde según su capacidad para la adaptación o mitigación frente al cambio climático en la ciudad de Arequipa.

Tabla 2 Servicios ecosistémicos y cambio climático

<i>Principal tipo de servicio ecosistémico</i>	Cambio climático						
	Adaptación			Mitigación			
	Mitigación del efecto isla de calor urbano: evapotranspiración, sombreado y flujo de	Fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas al cambio climático	Almacenamiento de agua de inundación y reducción de la escorrentía para reducir el riesgo de inundaciones	Secuestro de carbón	Fomentar los viajes sostenibles	Reducir el uso de energía para la calefacción y refrigeración de edificios.	Proporcionar espacio para las energías renovables
Provisión							
<i>Agua</i>			•				
Regulación							
<i>Calidad del aire</i>					•		
<i>Regulación climática</i>	•	•		•	•	•	•
<i>Regulación de eventos extremos</i>			•				
<i>Regulación de los flujos de agua</i>			•				
Soporte							
<i>Mantenimiento de ciclos de vida de especies migratorias</i>		•					

Fuente: Elaboración propia a partir de European Environment Agency (2011)

3.2.2.2 Determinación de los *inputs* para el modelo de mitigación de inundación del software InVEST en el tramo urbano del río Chili, Arequipa

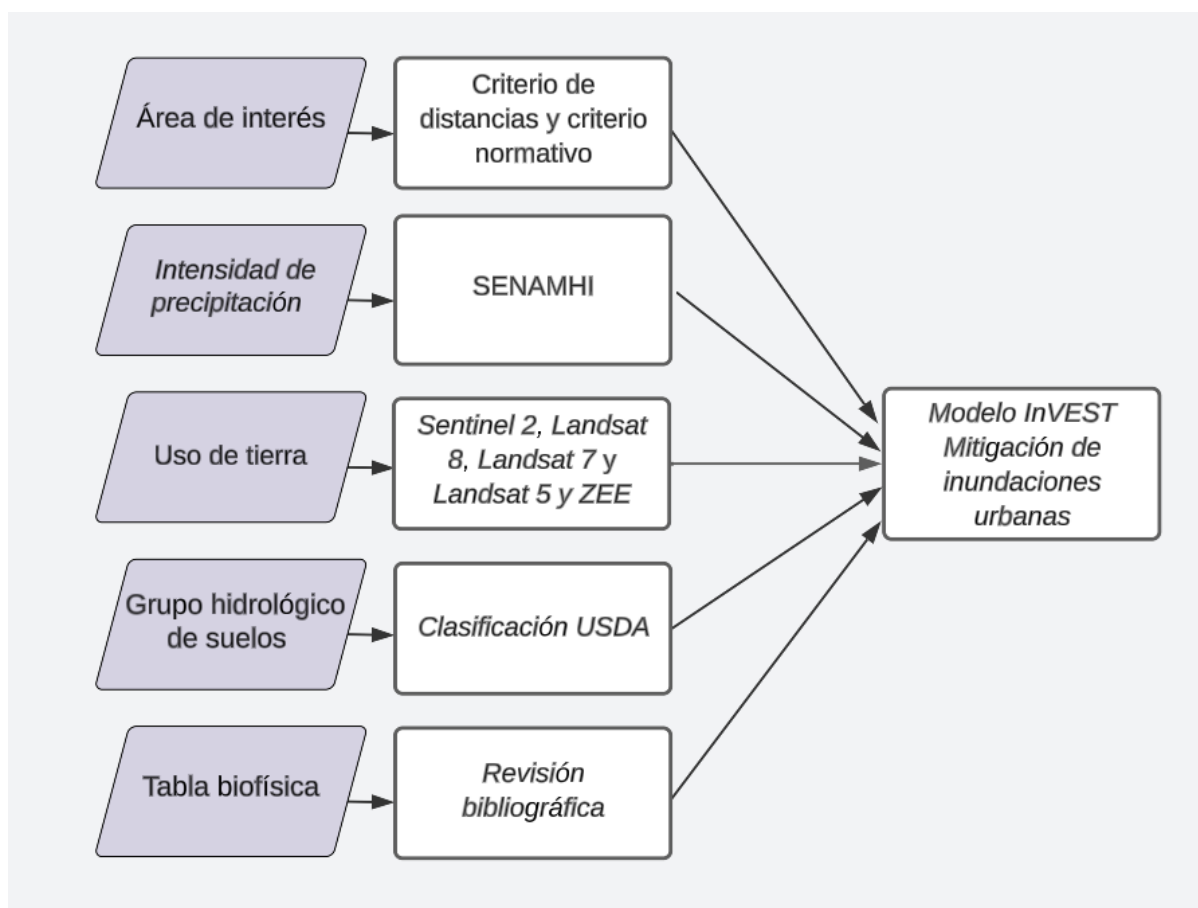
Las infraestructuras naturales desempeñan un papel crucial en la reducción de las inundaciones, el modelo considera el potencial de la infraestructura verde para la reducción de la escorrentía, ralentizando los flujos superficiales y creando espacio para el agua (como en las llanuras aluviales o las cuencas).

A partir de la identificación anterior, se trabajó el Modelo de Mitigación de Inundaciones Urbanas, el cual es parte de los servicios ecosistémicos modelados a través del software InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) versión 3.12.0. y evalúa la capacidad de las ciudades para reducir la escorrentía debido a precipitaciones extremas, limitando o reduciendo el riesgo de inundaciones. Tiene en consideración la precipitación en el área de estudio como parte de la data necesaria para estimar la descarga de escorrentía

resultante. Se obtuvieron estos datos para el periodo de estudio de 1984 a 2022, para evaluar los cambios en el servicio ecosistémico a lo largo del tiempo.

En la Figura 2 se muestra los datos de entrada necesarios para el modelo y la descripción de cada dato.

Figura 2 *Inputs* para el modelo INVEST



Fuente: Elaboración propia a partir de Vilca et al. (2023)

3.2.2.2.1 Intensidad de precipitación

La intensidad de precipitación es la medida de la lluvia total para un evento de tormenta dado, esta investigación considera el valor promedio de las precipitaciones (mm) entre los años 1981 y 2021. La información se obtuvo de la base de datos PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) que es resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (Aybar et al., 2017).

3.2.2.2.2 Uso de suelo / Cobertura vegetal (LULC)

Se utilizó las imágenes satelitales de *Sentinel 2*, *Landsat 8*, *Landsat 7* y *Landsat 5* correspondientes a cada año, además del documento de Zonificación Ecológica Económica (ZEE) de la región de Arequipa. Se dividió el área de estudio en 6 clases: río, monte ribereño, área agrícola, área urbana, cardonal y puyal; a través de la herramienta de polígonos ROI en el software QGIS 3.28. Se creó un mosaico perfecto que divida el ráster en las clases anteriormente mencionadas y uniformizó el tamaño de píxel en todos los años a una resolución de 10x10m, el cual fue el ráster final con la clasificación de uso de suelo (LULC) a ingresar al modelo. Este ráster fue validado mediante el método de análisis de precisión de polígonos. Este modelo permite la creación de polígonos de forma manual a lo largo del ráster, luego de lo cual se clasifican y se aplica la herramienta de precisión (postprocesamiento del SCP plugin en QGIS) (**Anexo D** –).

3.2.2.2.3 Grupo Hidrológico de suelos (HSG)

Son componentes fundamentales del método de estimación de la escorrentía pluvial del Servicio de Conservación del Suelo del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Los suelos se han clasificado esencialmente en cuatro clases estándar de grupos hidrológicos de suelos -A, B, C y D- de acuerdo con la clasificación del USDA (Tabla 3), lo cual apoya para la modelización de la escorrentía basada en el número de curva

Tabla 3 Clasificación de Grupos Hidrológicos de suelo según la USDA

Clasificación de Grupos Hidrológicos de suelo según la USDA.

Grupo A	Suelos con bajo potencial de escorrentía y alta tasa de transmisión de agua (más del 90% arena y <10% arcilla)
Grupo B	Suelos con un potencial de escorrentía moderadamente bajo y una tasa moderada de transmisión de agua (entre 10 y 20 % de arcilla y entre 50 y 90 % de arena)
Grupo C	Suelos con un potencial de escorrentía moderadamente alto (entre 20 y 40 % de arcilla y <50 % de arena)
Grupo D	Suelos con alto potencial de escorrentía y baja tasa de transmisión (más del 40 % de arcilla y <50 % de arena)

Fuente: Quagliolo et al., (2021)

3.2.2.2.4 Tabla Biofísica

La tabla biofísica contiene información del modelo correspondiente a cada una de las clases de uso del suelo en el mapa de Cobertura vegetal, donde el número de curva para cada grupo hidrológico se estimó en base a la Tabla 3 y revisión bibliográfica. Cada fila es una clase de uso del suelo/cobertura del suelo y las columnas se nombraron y definieron de la siguiente manera (Sharp et al., 2019):

- **lucode:** Códigos LULC asignados, se asignó un número entero para cada código, para el área de estudio se numeraron del 1 al 6.
- **cn_a:** El valor del número de curva para este tipo de LULC en el código de grupo de suelos A.
- **cn_b:** El valor del número de curva para este tipo de LULC en el código de grupo de suelos B.
- **cn_c:** El valor del número de curva para este tipo de LULC en el código de grupo de suelos C.
- **cn_d:** El valor del número de curva para este tipo de LULC en el código de grupo de suelos D.

3.2.2.3 Elaboración de un análisis multitemporal de la variación del servicio ecosistémico de mitigación de inundaciones en el tramo urbano del río Chili, Arequipa.

En base a los indicadores ingresados al modelo, se obtuvieron como resultados del modelo retención de escorrentía (%; m^3) y escorrentía (m^3) para cada año de estudio. Se obtuvieron estos resultados en formato ráster, que muestren la distribución espacial de la variación de este modelo a lo largo del tiempo del año estudio.

Como resultado del análisis multitemporal, se obtuvieron tablas y mapas con los resultados del servicio ecosistémico, a partir de los cuales, se compararon y analizaron su variación en un espacio temporal de 30 años (Kharytonov et al., 2019).



CAPÍTULO IV

4 Resultados y discusión

4.1 Identificación los servicios ecosistémicos relacionados a la adaptación al cambio climático del tramo urbano del río Chili, Arequipa

4.1.1 Selección de SE a evaluar

En base a la revisión bibliográfica, donde se consideraron 14 documentos entre artículos, libros y reportes (Cano & Haller, 2018; García et al., 2020; Magdaleno, 2017; Magdaleno et al., 2018; O'Donnell et al., 2020; Ojeda, 2017, 2020; Romero-Duque et al., 2020; Ruiz Meza, 2018; Vásquez, 2016; D. Wu et al., 2018; Yang et al., 2020; Zambrano & Bernard, 1993; Zamora Saenz et al., 2018; Zingraff-hamed, 2018), se obtuvo la lista de 36 SE (Tabla 4).

Tabla 4 Revisión bibliográfica de servicios ecosistémicos asociados a BGI.

Tipo	Servicio Ecosistémico identificado
Provisión	Agua dulce
	Productos maderables
	Productos no maderables
	Alimento
	Plantas como fuente de energía
Regulación	Control de erosión y mantenimiento de suelo
	Almacenamiento de nutrientes
	Control de plagas y enfermedades
	Control de sequías
	Regulación de los regímenes de lluvia y efecto albedo
	Mantenimiento de la productividad de los ecosistemas acuáticos
	Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono atmosférico.
	Calidad del agua
	Regulación de flujos de agua
	Reducción de riesgos por crecientes
	Confort térmico, reducción del uso de energía
	Regulación del clima local.
	Regulación de la calidad de aire
Protección contra incendios	
Mantener las poblaciones y los hábitats.	
Polinización	
Cultural	Belleza escénica
	Ecoturismo, recreación
	Educación
	Salud física y mental

	Legado o herencia cultural
	Saberes tradicionales
	Interacciones espirituales e intelectuales
	Investigación
Soporte	Mantenimiento funcional de ecosistemas
	Formación del suelo
	Producción primaria
	Ciclo de nutrientes
	Ciclo del agua

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Evaluación de importancia de SE

4.1.2.1 Evaluación internacional de importancia de SE

Como resultado de la encuesta realizada a expertos internacionales (Anexo B – Resultados de encuesta Internacional), se toma el promedio del valor de importancia obtenido, luego de ello, como resultado de la aplicación de Análisis de Varianza ANOVA (Tabla 5), se determina que de los 36 SE evaluados, solo 23 comparten la Agrupación A, y a su vez tienen una media mayor o igual a 4. En esta encuesta el SE que tuvo menor valoración en cuanto a su importancia fue el SE purificación de aire, con una media de 3.969; mientras que el de mayor valoración fue el de Educación ambiental con una media de 4.813 (Tabla 5).

Tabla 5 Resultado de ANOVA para los servicios ecosistémicos evaluados en la encuesta internacional

Factor	N	Media	Agrupación											
Educación ambiental	32	4.813	A											
Mantenimiento funcional de ecosistemas	31	4.7419	A	B										
Salud física y mental	32	4.688	A	B										
Ciclo del agua	31	4.613	A	B	C									
Legado o herencia cultural	32	4.594	A	B	C									
Belleza escénica (Paisaje)	32	4.594	A	B	C									
Regulación de clima local	32	4.563	A	B	C									
Control de inundaciones y remoción en masa	32	4.563	A	B	C									
Mantener las poblaciones y los hábitats	32	4.469	A	B	C	D								
Investigación	32	4.406	A	B	C	D								
Confort térmico, reducción del uso de energía	32	4.406	A	B	C	D								
Interacciones espirituales e intelectuales	32	4.375	A	B	C	D	E							
Ciclo de sedimentos	30	4.367	A	B	C	D	E							
Calidad del agua	32	4.344	A	B	C	D	E							
Reducción de riesgos por crecientes	32	4.313	A	B	C	D	E	F						
Regulación del agua superficial, subterránea, subsuperficial y basal	32	4.250	A	B	C	D	E	F						
Saberes tradicionales	32	4.219	A	B	C	D	E	F	G					
Agua dulce	32	4.219	A	B	C	D	E	F	G					
Mantenimiento de la productividad	32	4.125	A	B	C	D	E	F	G	H				
Regulación de calidad de aire	32	4.031	A	B	C	D	E	F	G	H				
Regulación de los regímenes de lluvia y el efecto del albedo	32	4.031	A	B	C	D	E	F	G	H				
Ciclo de nutrientes	29	4.000	A	B	C	D	E	F	G	H	I			

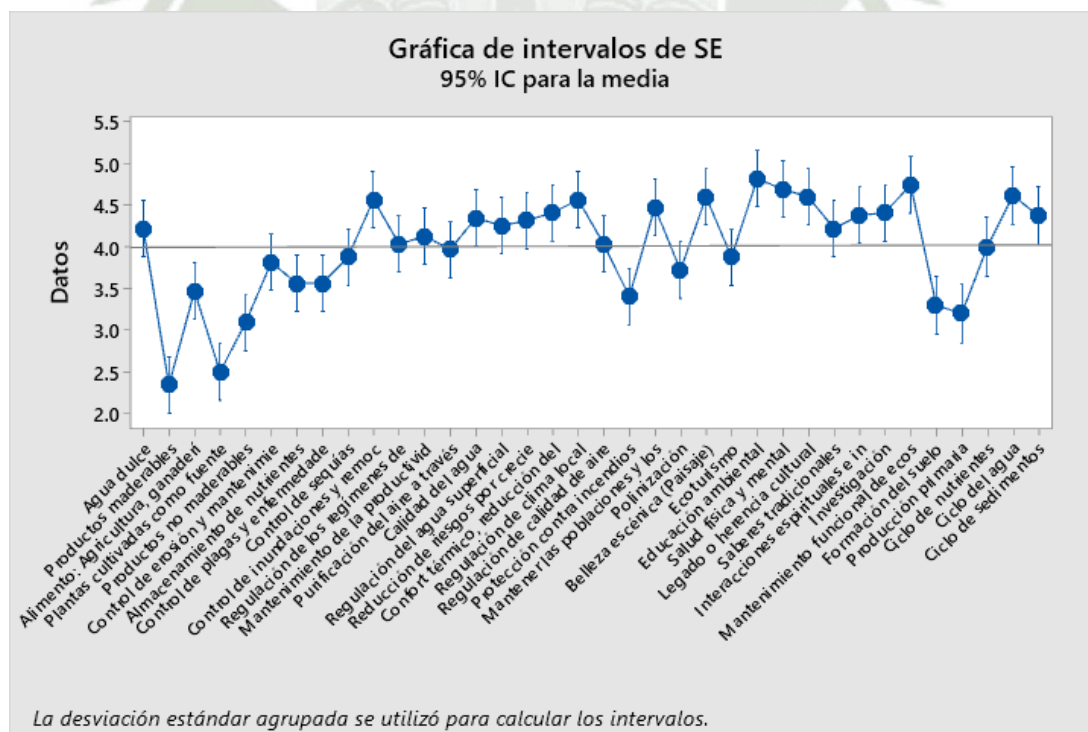
Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono	32	3.969	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Ecoturismo	32	3.875		B	C	D	E	F	G	H	I
Control de sequías	32	3.875		B	C	D	E	F	G	H	I
Control de erosión y mantenimiento del suelo	32	3.813		B	C	D	E	F	G	H	I
Polinización	32	3.719			C	D	E	F	G	H	I
Control de plagas y enfermedades	32	3.563				D	E	F	G	H	I
Almacenamiento de nutrientes	32	3.563				D	E	F	G	H	I
Alimento: Agricultura, ganadería	32	3.469					E	F	G	H	I
Protección contra incendios	32	3.406						F	G	H	I
Formación del suelo	30	3.300							G	H	I
Producción primaria	30	3.200								H	I
Productos no maderables	32	3.094									J
Plantas cultivadas como fuente de energía	32	2.500									J
Productos maderables	32	2.344									J

Fuente: Elaboración propia.

La desviación estándar agrupada se empleó para construir los intervalos de confianza lo cual muestra por qué las longitudes son similares en el gráfico de la Figura 3, también se observan los 13 SE cuyas medias son notablemente inferiores a 4.

Estos SE evaluados son considerados como los más importantes, por lo que son tomados a consideración para la encuesta local.

Figura 3 Gráfica de medias e intervalos para los resultados de la Evaluación Internacional de 36 SE



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2 Evaluación local de importancia de SE

De manera similar, para el caso de la evaluación local se siguió la misma metodología que la evaluación internacional, en el Anexo C – Resultados de encuesta Local se agregan los resultados detallados de la encuesta local. Como resultado de la aplicación del ANOVA, se observó que, en esta evaluación, las medias de las valoraciones de los SE no tuvieron una variación significativa, de tal forma que, como se muestra en la Tabla 6, en las agrupaciones solo se tiene valores A y B, donde los SE con un promedio inferior a 4 fueron: Interacciones espirituales e individuales, confort térmico, reducción del uso de energía y regulación de los regímenes de lluvia y el efecto albedo. A su vez, el SE que fue considerado como el más importante fue el de provisión de agua dulce con una media de 4.85.

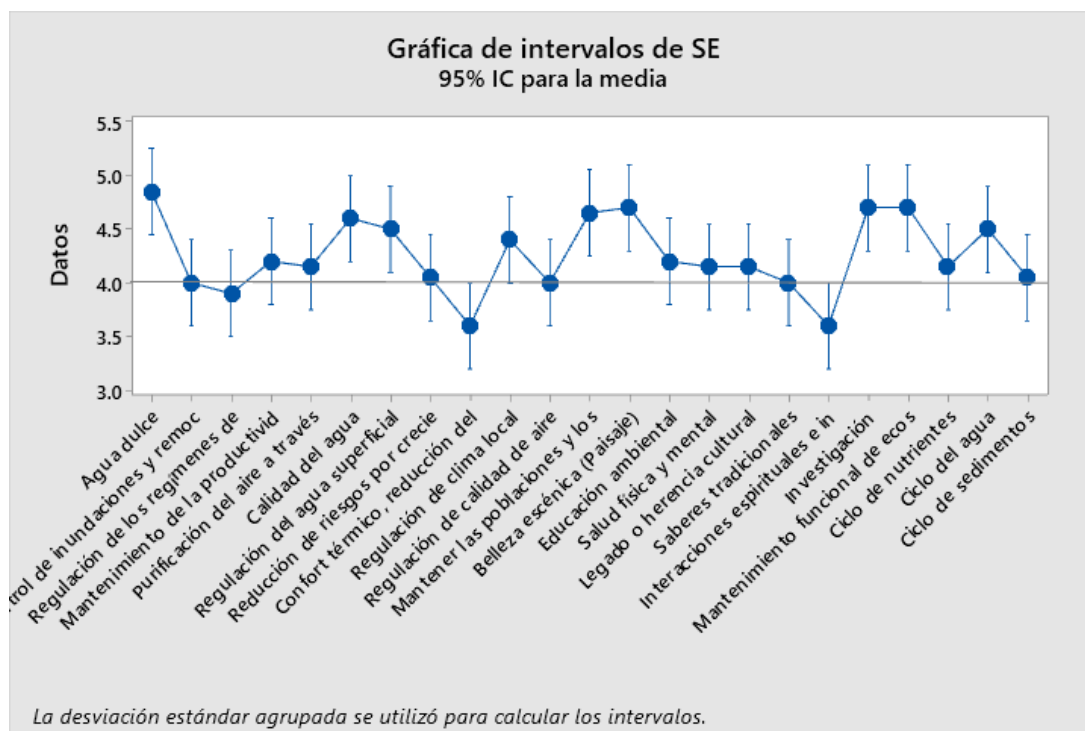
Tabla 6 Resultado de ANOVA para los servicios ecosistémicos evaluados en la encuesta local

Factor	N	Media	Agrupación	
Agua dulce	20	4.850	A	
Mantenimiento funcional de ecosistemas	20	4.700	A	
Investigación	20	4.700	A	
Belleza escénica (Paisaje)	20	4.700	A	
Mantener las poblaciones y los hábitats	20	4.650	A	
Calidad del agua	20	4.600	A	B
Ciclo del agua	20	4.500	A	B
Regulación del agua superficial, subterránea, subsuperficial y basal	20	4.500	A	B
Regulación de clima local	20	4.400	A	B
Educación ambiental	20	4.200	A	B
Mantenimiento de la productividad de los ecosistemas acuáticos	20	4.200	A	B
Ciclo de nutrientes	20	4.150	A	B
Legado o herencia cultural	20	4.150	A	B
Salud física y mental	20	4.150	A	B
Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono	20	4.150	A	B
Ciclo de sedimentos	20	4.050	A	B
Reducción de riesgos por crecientes	20	4.050	A	B
Saberes tradicionales	20	4.000	A	B
Regulación de calidad de aire	20	4.000	A	B
Control de inundaciones y remoción en masa	20	4.000	A	B
Regulación de los regímenes de lluvias y el efecto albedo	20	3.900	A	B
Interacciones espirituales e intelectuales	20	3.600	B	
Confort térmico, reducción del uso de energía	20	3.600	B	

Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 4, podemos verificar que los SE con medias menores a 4 son: interacciones espirituales e individuales, confort térmico, reducción del uso de energía y regulación de los regímenes de lluvia y el efecto albedo.

Figura 4 Gráfica de medias e intervalos para los resultados de la encuesta local de 23 SE



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Servicios ecosistémicos, infraestructura verde-azul y cambio climático

Finalmente, como parte de la identificación de los SE resultantes para el tramo urbano del río Chili, se clasificaron según su capacidad para la adaptación o mitigación frente al cambio climático (Tabla 7):

Tabla 7 Servicios ecosistémicos del río Chili asociados a mecanismos de adaptación y mitigación al cambio climático.

Tipo	Servicio ecosistémico	Ámbito	
		Adaptación	Mitigación
Provisión	Agua dulce	•	
Regulación	Control de inundaciones y remoción en masa.	•	
	Regulación del clima local	•	
	Mantener poblaciones y hábitats.	•	
	Calidad de agua	•	
	Reducción de riesgos por crecientes.	•	
	Regulación del agua superficial, subterránea, subsuperficial y basal.	•	
	Mantenimiento de la productividad de los	•	

	ecosistemas acuáticos.	•
	Regulación de calidad de aire.	•
	Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono	
Soporte	Mantenimiento funcional de ecosistemas	•
	Ciclo del agua	•
	Ciclo de sedimentos	•
	Ciclo de nutrientes	•

Fuente: Elaboración propia.

Es por ello, que se puede decir que, para los expertos locales e internacionales, son importantes muchos de los servicios ecosistémicos asociados a la adaptación al cambio climático que puede ser provisto en el tramo urbano del río Chili. Solo en el caso de los SE culturales (belleza escénica, investigación, educación ambiental, salud física y mental, legado o herencia cultural, investigación y saberes tradicionales), no tienen una relación directa con medidas de adaptación o mitigación al cambio climático.

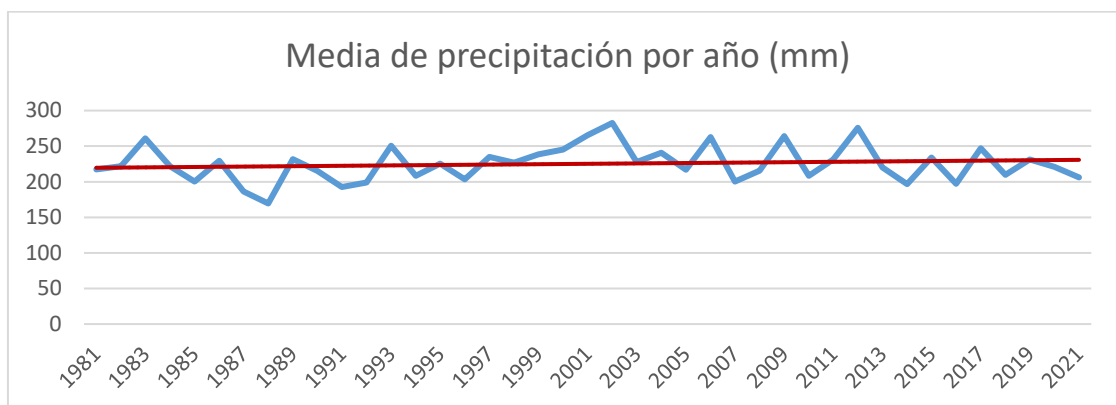
Para efectos de este estudio, se trabajó con el servicio ecosistémico de modelo de mitigación de inundación, el cual se identifica como un servicio de soporte (resaltado en la Tabla 7). Lo cual está en línea con la revisión bibliográfica realizada en la Tabla 4. La importancia de este servicio se relaciona a que una adecuada gestión de los SE, a través de las infraestructura azul-verde, pueden contribuir a la reducción de riesgos, y ser un mecanismo de adaptación al cambio climático, de manera funcional y rentable a largo plazo (Depietri & McPhearson, 2017). Por lo que la restauración ecosistémica de este SE en las ciudades tendría impactos significativos en la regulación de flujos de agua, reducción de inundaciones y otros eventos extremos. Es decir, este SE puede contribuir a la adaptación al cambio climático, fortaleciendo la resiliencia de los ecosistemas frente al mismo.

4.2 Determinación de los *inputs* para el modelo de mitigación de inundación del software InVEST en el tramo urbano del río Chili, Arequipa

4.2.1.1 Intensidad de precipitación

Como resultado de la descarga de los valores diarios de precipitación de la base de datos PISCO, para el periodo de tiempo 1984 a 2022, de la página de SENAMHI, se procesaron estos datos para calcular a la media anual, finalmente obteniendo un valor de precipitación de 225mm para el tiempo del estudio.

Figura 5 Media de precipitación anual para el periodo 1981-2021



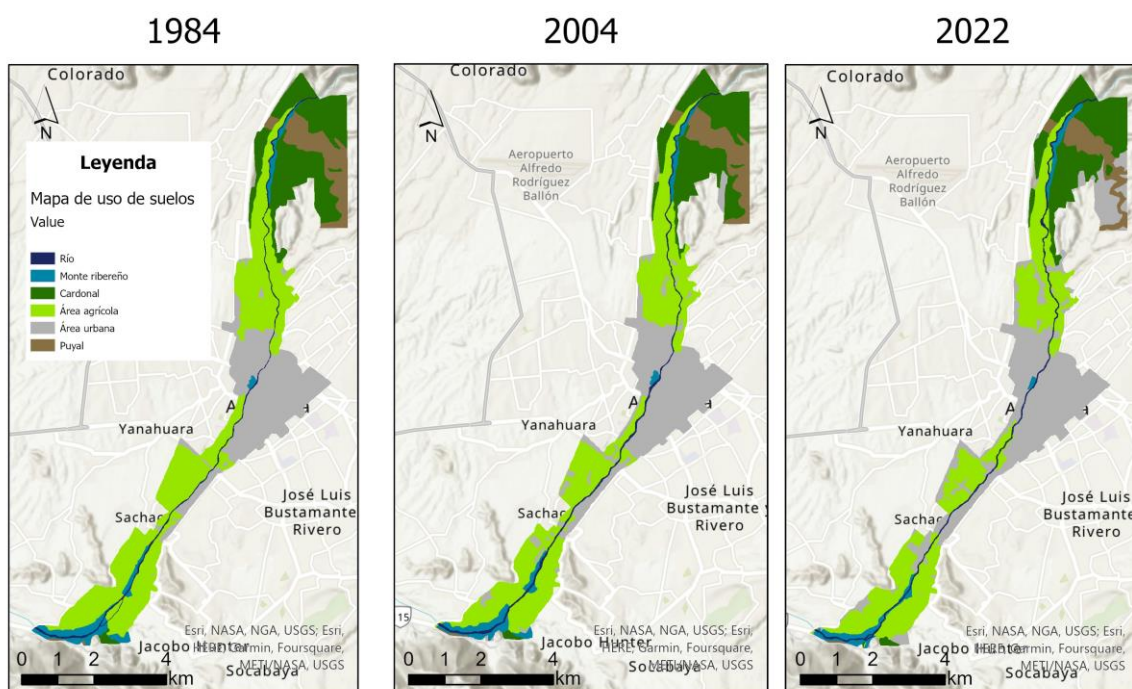
Fuente: Elaboración propia a partir de PISCO (Huerta et al., 2022).

Como resultado, se tiene como *input* una intensidad de precipitación de 225mm, constante en el modelo para el periodo de tiempo evaluado.

4.2.1.2 Uso de suelo / Cobertura vegetal

Las capas de uso de suelo empleados en el modelo son los que se muestran en la Figura 6, se trabajó con el *input* en el formato ráster. Se tomaron los años 1984, 2004 y 2022 para referenciar los cambios en el uso de suelo en el área de estudio.

Figura 6 Mapa de uso de suelos para los años 1984, 2004 y 2022



Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.3 Grupo Hidrológico de suelos (HSG)

En esta capa, según la información obtenida de la USDA, se observan tres clases de grupos hidrológicos de suelos, como se puede observar en el Anexo E – Capa de HSG.

Este input se mantiene constante para todos los años, por lo que no constituye un elemento de análisis.

4.2.1.4 Tabla Biofísica

La tabla biofísica contiene información del modelo correspondiente a cada una de las clases de uso del suelo en el mapa de Cobertura vegetal, donde el número de curva para cada grupo hidrológico se estimó en base a la Tabla 3 y revisión bibliográfica. Como resultado, se generaron tablas biofísicas para cada año evaluado, se muestra como ejemplo la tabla generada para el año 2022 (Tabla 8).

Tabla 8 Tabla biofísica del año 2022 para el modelo InVEST

Clase de uso de suelo	Count	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D
Sin datos (0)	3356896	1	1	1	1
Río (1)	7927	1	1	1	1
Monte ribereño (2)	8652	63	74	82	85
Cardonal (3)	44631	71	72	73	74
Área agrícola (4)	84991	68	79	86	89
Área urbana (5)	97163	63	77	85	88
Puyal (6)	15102	49	46	48	47

Fuente: Elaboración propia a partir de Ross et al. (2018).

Estos inputs se ingresaron al modelo de Mitigación de riesgos de inundación, para que genere los resultados para cada año (Anexo F – Vista de *inputs* al modelo InVEST).

4.3 Elaboración de un análisis multitemporal de la variación del servicio ecosistémico de mitigación de inundaciones en el tramo urbano del río Chili, Arequipa.

Los resultados del modelo proporcionan datos sobre el proceso de escorrentía, identificando valores de retención de escorrentía y de volumen de escorrentía superficial. La Tabla 9 muestra los resultados de Retención de Escorrentía (%; m³) y escorrentía (m³) promedio para toda el área de estudio considerada como parte del análisis para el periodo 1984 – 2022.

Todos los valores se han calculado en base a la precipitación promedio para el tiempo de estudio. Se observa que los valores de retención de escorrentía en promedio son de 33.29%.

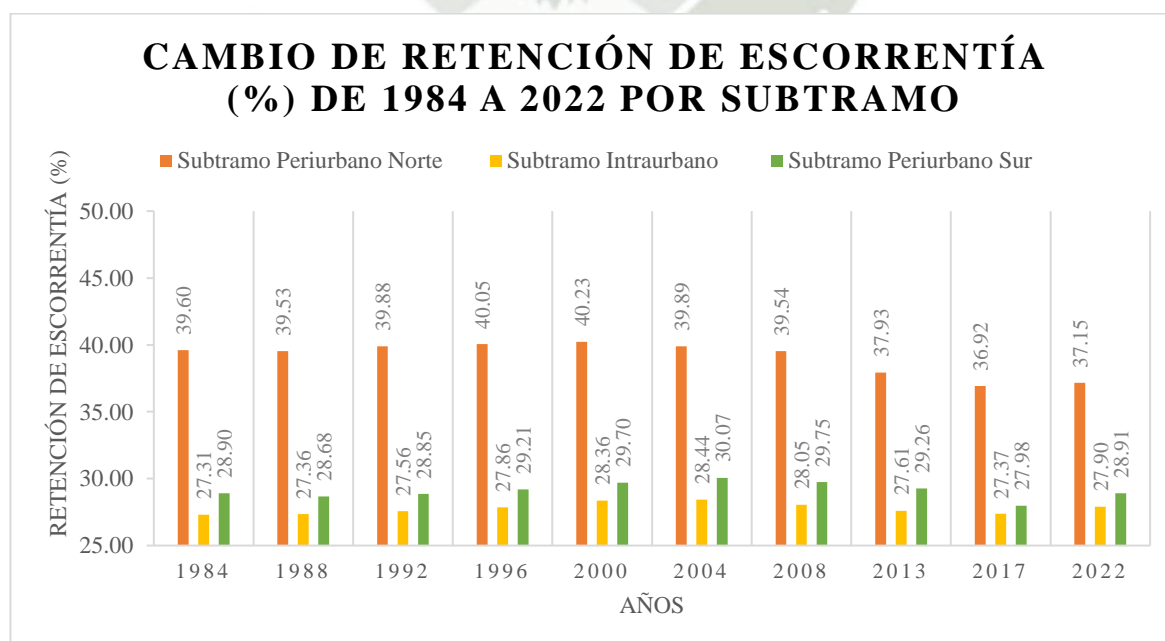
De acuerdo con el análisis multitemporal realizado (Tabla 9), los valores más bajos y altos de retención son 31.88 y 34.12% pertenecientes a los años 2017 y 2000, respectivamente. Esta baja capacidad en el servicio ecosistémico de retención de la escorrentía puede estar relacionado a que el río Chili está rodeado por la ciudad y las construcciones, por lo que no tiene ningún principio de infraestructura verde que puedan regular dicha escorrentía en eventos de precipitación intensas (Pappalardo et al., 2017).

Tabla 9 Resultados del Modelo de Mitigación del Riesgo de Inundación para cada año

Año	Precipitación (mm)	Retención de escorrentía (%)	Retención de escorrentía (m ³)	Escorrentía (m ³)
1984	225	33.334	7.500	149.998395
1988	225	33.251	7.481	150.185233
1992	225	33.514	7.541	149.592862
1996	225	33.770	7.598	149.017197
2000	225	34.123	7.678	148.223307
2004	225	34.093	7.671	148.291845
2008	225	33.740	7.591	149.085583
2013	225	32.758	7.370	151.295524
2017	225	31.882	7.174	153.264972
2022	225	32.384	7.286	152.136577
Promedio		33.285	7.489	150.109

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Cambio de retención de escorrentía (%) de 1984 a 2022 por subtramo

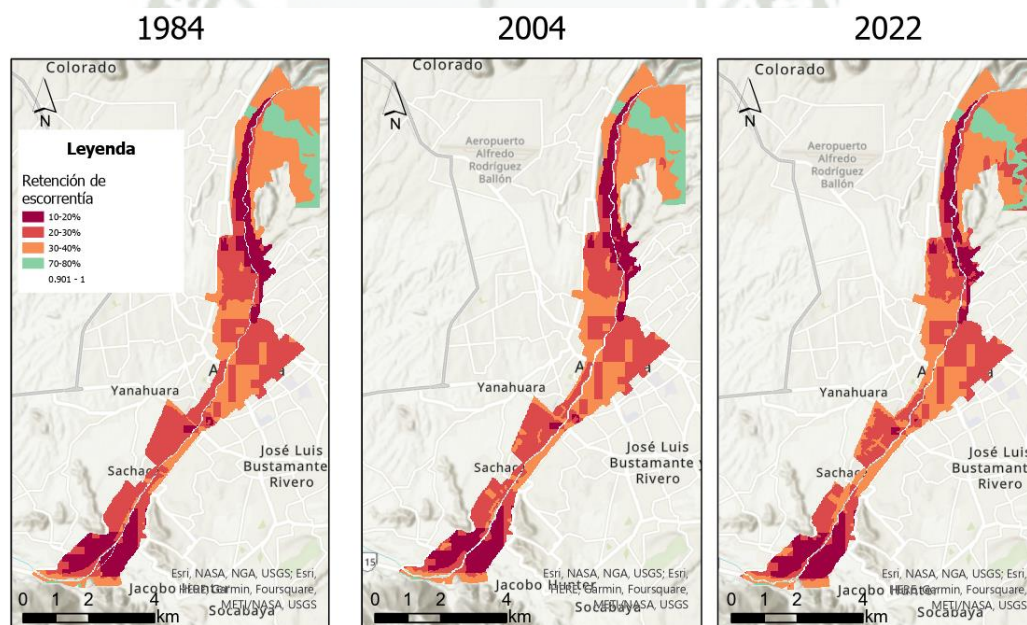


Fuente: Elaboración propia.

Se analizó los resultados a nivel de tramos: Subtramo Periurbano Norte, Subtramo Intraurbano y Subtramo Periurbano Sur, detallado en la Figura 7. En términos de índice de retención de la escorrentía, el valor más bajo de capacidad de retención es el 27,31% perteneciente al Subtramo Intraurbano en el año 1984 (Figura 7). En comparación, el valor más alto de retención es el 40.23% del Subtramo Periurbano Norte en el año 2000 (Tabla 3), siendo este el tramo con mejor desempeño. Se observó que la retención de escorrentía en el tramo norte disminuyó más de un 8,2% en el tiempo (1984 – 2022).

En la Figura 8 se ilustra la distribución espacial de la capacidad de retención de escorrentía para tres años del análisis multitemporal para esta área de estudio. Las áreas más próximas al color azul, presentan una mayor retención de escorrentía, mientras que las más próximas al rojo registran una menor cantidad de retención escorrentía en el área. Se observan cambios en la retención de escorrentía en el tramo norte del área de estudio.

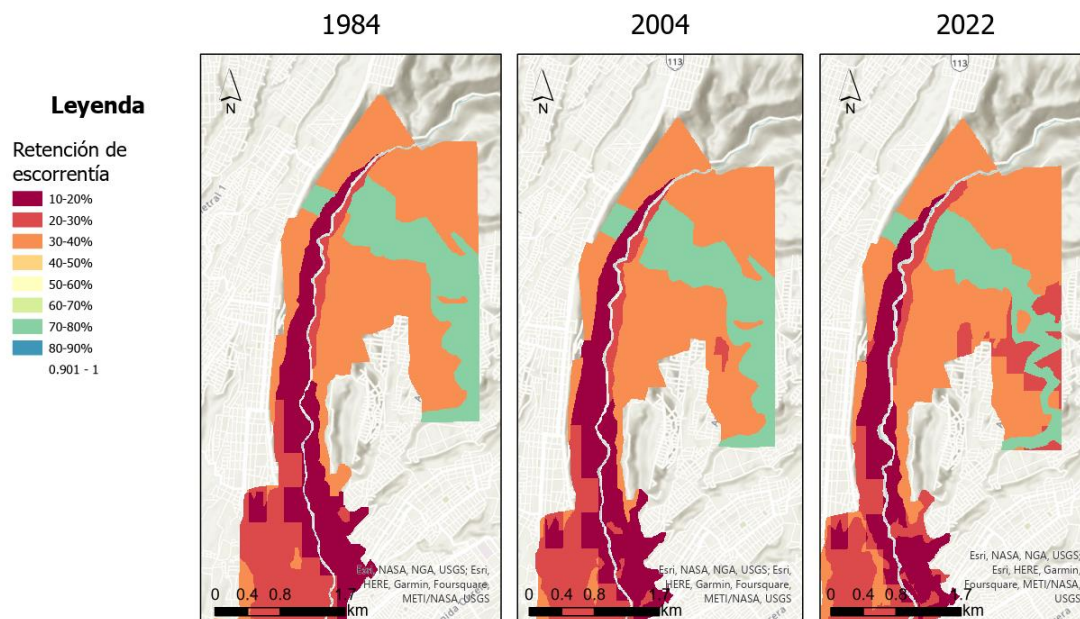
Figura 8 Retención de escorrentía (%) en el área de estudio para el periodo 1984 – 2022.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9 muestra la distribución espacial de la retención de escorrentía (%) en el Subtramo Periurbano Norte. Se observa una disminución drástica en la sección noreste del Subtramo Periurbano Norte, donde se observan áreas que disminuyeron su capacidad de retención de escorrentía de un 70-80% a un 20-30%.

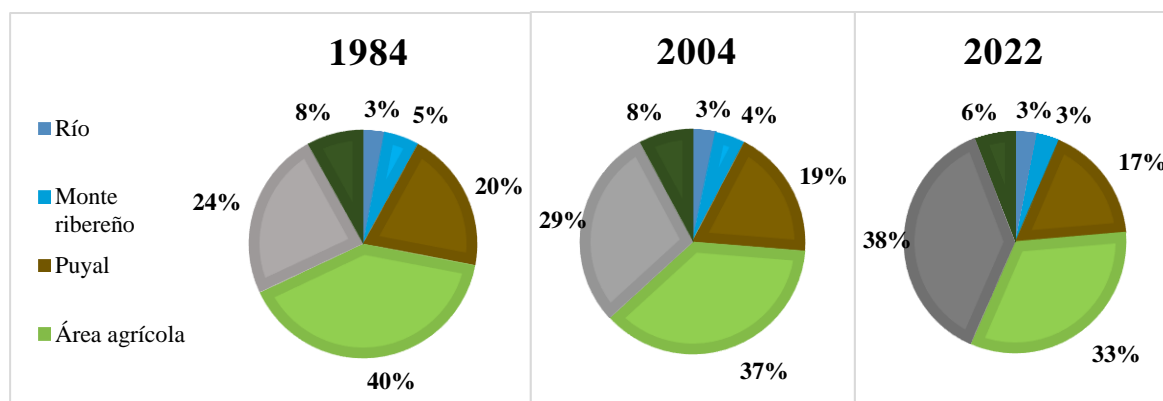
Figura 9 Retención de escorrentía (%) en el Subtramo Periurbano Norte para el periodo 1984 – 2022



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se denota un incremento progresivo del área urbana, aumentando en un 52%, y una disminución en las coberturas vegetales como agricultura, monte ribereño, puyal y cardonal, en el periodo de estudio. Asimismo, se observa que en 1984 el uso de suelo predominante era agrícola, mientras que en el año 2022 es área urbana. Este comportamiento puede deberse a que en los últimos años se desarrollan intensos procesos de crecimiento urbano en las áreas periurbanas norte de la ciudad, hasta en un 14% (Villena et. Al, 2011), por lo que se percibe una disminución en la cobertura vegetal, tal como la agrícola. Además de ello, se observa que el crecimiento urbano cerca de los anexos, como las torrenteras, va en aumento (Mazer et al., 2021).

Figura 10 Porcentaje de cambio de uso de suelo de 1984 a 2022



Fuente: Elaboración propia.

Es así que, a medida que el paisaje se urbaniza resulta en la reducción de infraestructura azul-verde, se reduce la capacidad de retención escorrentía que hacen que las ciudades sean vulnerables a las inundaciones urbanas (Quagliolo et al., 2021; Kadaverugu et al., 2020). Por lo tanto, para el caso de estudio se infiere que la disminución de la capacidad de escorrentía resultaría en el aumento de los eventos de inundación urbana.

La evaluación de riesgos de inundación, sirven de base para la gestión actual y futura de las inundaciones urbanas, especialmente, en temas de prevención de desastres (Li et al., 2022). Es así que, la infraestructura azul-verde es reconocida como una solución basada en la naturaleza que permite mitigar los riesgos por inundaciones urbanas (Kumari et al., 2021). Especialmente en áreas altamente urbanizadas, como la ciudad de Arequipa, los ríos con abundante capacidad de soportar inundaciones pueden utilizarse plenamente para controlarlas (Liu et al 2020). La infraestructura azul-verde identificada en el área de estudio ofrece buenas condiciones para la retención y ralentización de la escorrentía durante inundaciones temporales o crecidas repentinas, como se muestra en los estudios de (Quagliolo et al., 2021; Bose and Mazumdar, 2023) aplicados en áreas urbanas.

El modelo InVEST puede presentar algunas limitaciones, al utilizar un enfoque simple (Quagliolo et al., 2021) y, para el caso de estudio, estuvo limitado por la información meteorológica limitada para la región de Arequipa (Lima Moraes et al, 2021). Sin embargo, la clasificación de usos de suelo suele estar bien reflejada, permitiendo que las infraestructuras naturales se representen en los resultados del modelo, sumado a ello, el modelo es escalable y sencillo de utilizar, ya que el uso de GIS establece un modelo más refinado y dinámico para las zonas urbanas, lo cual representa una ventaja para la identificación de riesgos locales (Li et al., 2022). Hack (2020) demostró la capacidad del modelo InVEST para estudiar diferentes tipos de amenazas urbanas que impactan la calidad de hábitat de los corredores fluviales urbanos, como la invasión del corredor por creciente urbanización. Es así como el modelo InVEST permite espacializar los servicios ecosistémicos que otorgan las áreas naturales y semi-naturales a la ciudad (Hamel et al., 2021), por lo que es una herramienta útil para los planificadores urbanos en la definición de estrategias de adaptación y toma de decisiones frente al riesgo de inundaciones repentinas en un área metropolitana (Bose and Mazumdar, 2023; Quagliolo et al., 2021; Li et al., 2022). Otros estudios que aplican el modelo InVEST de mitigación de riesgo de inundación urbana, realizan análisis de sensibilidad, lo cual permite el análisis de escenarios a futuro, para generar estrategias resilientes a eventos de inundación repentina (Quagliolo et al., 2021).



CAPÍTULO V

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

1. Se identificaron los principales servicios ecosistémicos relacionados a la adaptación al cambio climático del tramo urbano del río Chili, Arequipa. Siendo uno de los servicios identificados el servicio ecosistémico de mitigación de inundaciones urbanas.
2. Los inputs requeridos para el modelo de mitigación de inundación fueron el área estudio, los valores de profundidad de precipitación, LULC o capa de uso de suelos, grupos hidrológicos del suelo, y tabla biofísica, que se generaron para el periodo de 1984 – 2022.
3. Los valores de retención de escorrentía promedio para el área de estudio se calcularon en 33.29%. Se observó una disminución en 8,2% de la retención de escorrentía en el Subtramo Periurbano Norte a través del tiempo (1984 – 2022). Se observa el cambio de uso de suelos como un factor influyente en la disminución de la escorrentía, asociado al incremento del área urbana y disminución de infraestructuras azul-verde.
4. Los resultados del estudio permiten visibilizar el impacto a los ecosistemas que forman parte del tramo urbano, tales como el monte ribereño, puyal y cardonal, que tienen un valor de biodiversidad importante al contener fauna y flora endémica.
5. El análisis obtenido constituye una herramienta muy importante para impulsar la renaturalización de los ríos urbanos como corredores ecológicos y mitigadores de inundaciones urbanas, permitiendo incrementar el nivel de resiliencia de las ciudades.
6. La cuantificación de los valores de pérdida de la capacidad de retención de escorrentía en el área de estudio permite que a futuro se realice una valorización económica de este servicio ecosistémico, siendo referente para una adecuada gestión del tramo urbano del río Chili.

5.2 Recomendaciones

1. El modelo de mitigación de inundación urbana utilizando el software InVEST es una herramienta que permite espacializar los servicios ecosistémicos y es útil para los planificadores urbanos en la definición de estrategias de adaptación y toma de decisiones, sin embargo, puede tener limitaciones en la data disponible a nivel local.
2. Se recomienda aplicarlo utilizando la capa opcional de infraestructura urbana, en caso se utilice el modelo para estimar posibles daños a infraestructuras como edificios o viviendas, permitiendo la valorización de este servicio al estimar los daños potenciales causadas por la pérdida de la capacidad de retención de escorrentía.
3. Es de importancia la integración de herramientas como InVEST que permiten visualizar el impacto a los servicios ecosistémicos, tales como el servicio de mitigación de inundación urbana, en la gestión de infraestructura verde-azul, con el objetivo de que Arequipa sea una ciudad resiliente al cambio climático. Se recomiendan dentro de las estrategias de gestión, la renaturalización del tramo urbano del río Chili, para mitigar la pérdida de capacidad de retención de escorrentía, como estrategia preventiva de gestión de desastres.

REFERENCIAS

- Alves, A., Vojinovic, Z., Kapelan, Z., Sanchez, A., & Gersonius, B. (2020). Exploring trade-offs among the multiple benefits of green-blue-grey infrastructure for urban flood mitigation. *Science of the Total Environment*, 703, 134980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134980>
- ANA. (2018). Estudio hidrogeológico del acuífero del río Chili: informe final. In *Autoridad Nacional del Agua*. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4361>
- Bai, T., Wei, J., Yang, W., & Huang, Q. (2018). Multi-Objective Parameter Estimation of Improved Muskingum Model by Wolf Pack Algorithm and Its Application in Upper Hanjiang River, China. *Water*, 10(10), 1415. <https://doi.org/10.3390/w10101415>
- Barbosa, A., Martín, B., Hermoso, V., Arévalo-Torres, J., Barbière, J., Martínez-López, J., Domisch, S., Langhans, S. D., Balbi, S., Villa, F., Delacámara, G., Teixeira, H., Nogueira, A. J. A., Lillebø, A. I., Gil-Jiménez, Y., McDonald, H., & Iglesias-Campos, A. (2019). Cost-effective restoration and conservation planning in Green and Blue Infrastructure designs. A case study on the Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean: Andalusia (Spain) – Morocco. *Science of the Total Environment*, 652(November 2018), 1463–1473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.416>
- Berndtsson, R., Becker, P., Persson, A., Aspegren, H., Haghigatafshar, S., Jönsson, K., Larsson, R., Mobini, S., Mottaghi, M., Nilsson, J., Nordström, J., Pilesjö, P., Scholz, M., Sternudd, C., Sörensen, J., & Tussupova, K. (2019). Drivers of changing urban flood risk: A framework for action. *Journal of Environmental Management*, 240, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.094>
- Cárdenas Álvarez, J. P. (2016). *Aplicabilidad del software InVEST para el mapeo de servicios ecosistémicos: caso cuenca alta del río Claro*.
- Cavan, G., Butlin, T., Gill, S., Kingston, R., & Lindley, S. (2021). Handbook of Climate Change Adaptation. *Handbook of Climate Change Adaptation, Ipcc*, 1–27. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40455-9>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 1997 387:6630, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

- Debele, S. E., Kumar, P., Sahani, J., Marti-Cardona, B., Mickovski, S. B., Leo, L. S., Porcù, F., Bertini, F., Montesi, D., Vojinovic, Z., & Di Sabatino, S. (2019). Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards: Revised concepts, classification schemes and databases. *Environmental Research*, 179, 108799. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108799>
- Denton, F., Wilbanks, T. J., Abeysinghe, A. C., Burton, I., Gao, Q., Lemos, M. C., Masui, T., O'Brien, K. L., Warner, K., Bhadwal, S., Leal, W., Van Ypersele, J. P., & Wright, S. B. (2015). Climate-resilient pathways: Adaptation, mitigation, and sustainable development. In *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 1101–1131). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.025>
- Depietri, Y., & McPhearson, T. (2017). Integrating the Grey, Green, and Blue in Cities: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation and Risk Reduction. In *library.oapen.org* (pp. 91–109). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_6
- DGIP-MEF. (2015). *Lineamientos para la formulación de proyectos de inversión pública en diversidad biológica y servicios ecosistémicos* (DGIP-MEF (ed.); 1st ed.). Ministerio de Economía y Finanzas. https://www.mef.gov.pe/contenidos/inv_publica/docs/instrumentos_metod/ambiente/Lin_eamientos-para-la-formulacion-de-PIP-en-DB-y-SE.pdf
- Durán Vian, F., Pons Izquierdo, J. J., & Serrano Martínez, M. (2020). ¿Qué es un río urbano? Propuesta metodológica para su delimitación en España. *ACE: Architecture, City and Environment*, 15(44), 0–1. <https://doi.org/10.5821/ace.15.44.9035>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2018). Adapting Cities for Climate Change : The Role of the Green Infrastructure. *Planning for Climate Change*, 195–205. <https://doi.org/10.4324/9781351201117-23>
- González, D. (2017). Bases conceptuales y metodológicas para el estudio de los espacios fluviales urbanos. Un estudio de caso en Andalucía. *Estudios Geograficos*, 78(283), 657–679. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201723>
- Gutarra, S. (2019). Centro de Interpretación de Reserva Paisajística y Plan de restauración en la campiña del Rio Chili –Arequipa [Universidad Ricardo Palma]. In *Universidad Ricardo Palma*. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2870>
- Hack, J., Molewijk, D., & Beißler, M. R. (2020). A conceptual approach to modeling the geospatial impact of typical Urban threats on the habitat quality of river corridors.

Remote Sensing, 12(8), 1–22. <https://doi.org/10.3390/RS12081345>

Hamel, P., Guerry, A. D., Polasky, S., Han, B., Douglass, J. A., Hamann, M., Janke, B., Kuiper, J. J., Levrel, H., Liu, H., Lonsdorf, E., McDonald, R. I., Nootenboom, C., Ouyang, Z., Remme, R. P., Sharp, R. P., Tardieu, L., Viguié, V., Xu, D., ... Daily, G. C. (2021). Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. *Npj Urban Sustainability*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s42949-021-00027-9>

Hernández-Hernández, M., Olcina, J., & Morote, Á.-F. (2020). Urban Stormwater Management, a Tool for Adapting to Climate Change: From Risk to Resource. *Water*, 12(9), 2616. <https://doi.org/10.3390/w12092616>

Horacio, J. (2015). *Medicina fluvial: Un nuevo paradigma en la conservación y restauración de ríos bajo el enfoque de la geomorfología* (J. L. Benito Alonso (ed.); 1st ed.). Jolube Consultor Botánico y Editor. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=WuuFDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=Medicina+fluvial:+Un+nuevo+paradigma+en+la+conservación+y+restauración+de+los+ríos+bajo+el+enfoque+de+la+geomorfología&ots=IUvtrSmtMq&sig=JWPoZ4cIwR3uiaxJaVUyJW5zBLU&redir_esc=y#

Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., & Felipe-Obando, O. (2022). High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp_h). *Data in Brief*, 45, 108570. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108570>

Instituto Municipal de Planeamiento. (2016). *Memoria del PDM Arequipa Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa 2016-2025* (1st ed.). <http://impla.gob.pe/publicaciones/pdm-2016-2025/>

IPCC. (2014). Summary for policy makers. In *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511976988.002>

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Cambridge University Press* (Issue In Press). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

Kadaverugu, A., Nageshwar Rao, C., & Viswanadh, G. K. (2021). Quantification of flood mitigation services by urban green spaces using InVEST model: a case study of Hyderabad city, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), 589–602. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00937-0>

Karis, C., & Ferraro, R. (2017). Identificación De La Infraestructura Verde Y Azul En La Ciudad De Mar Del Plata. *Investigacion + Accion*, 20(19), 189–208.

Kumari, J., Dessai, K., Cardozo, Z. W., Pereira, B., Fernandes, R., Sakhardande, A., & Mascarenhas, S. (2021). River Water Resource Management and Flood Control Using GIS. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 105, 373–379. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8293-6_32

Lajo, M. (2019). *Gestión Integrada De La Subcuenca Oriental Del Rio Chili, Moyebaya - Piaca. Región Arequipa* [Univesridad Nacional de San Agustín]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12243>

Li, J., Wang, Z., & Lai, C. (2020). Severe drought events inducing large decrease of net primary productivity in mainland China during 1982–2015. *Science of The Total Environment*, 703, 135541. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135541>

Liu, Z., Cai, Y., Wang, S., Lan, F., & Wu, X. (2020). Small and Medium-Scale River Flood Controls in Highly Urbanized Areas: A Whole Region Perspective. *Water*, 12(1), 182. <https://doi.org/10.3390/w12010182>

Magdaleno, F. (2016). La restauración del bosque de ribera. In O. Vargas & S. Reyes (Eds.), *Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica* (p. 636). Gente Nueva Editorial.

Magdaleno, F., Cortes, F., & Molina, B. (2018). Infraestructuras verdes y azules: estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático. *Revista Digital Del Cedex*, (191), November, 105–112. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2350>

Martínez, H. J. (2019). Dinámica de servicios ecosistémicos y comportamiento hidrológico bajo escenarios de cambio climático en la región hidrográfica del estero de Jaltepeque, El Salvador. In *CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA* (Vol. 01, Issue 01).

Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos, El Peruano 12 (2014).

Ministerio del Ambiente. (2016). Guía de Valoración Económica del Patrimonio Natural. In Ministerio del Ambiente (Ed.), *Ministerio del Ambiente* (2nd ed.). <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/GVEPN-30-05-16-baja.pdf>

- Montesinos-Tubée, D. B. (2019). Diversidad florística, comunidades vegetales y propuestas de conservación del monte ribereño en el río Chili (Arequipa, Perú). *Arnaldoa*, 26(1). <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.261.26106>
- MPA. (2002). *Plan Director de Arequipa Metropolitana 2002-2015*.
- Natural Capital Coalition. (2018). *Connecting Finance and Natural Capital: A Supplement to the Natural Capital Protocol*. <http://www.naturalcapitalcoalition.org/>
- O'Donnell, E., Thorne, C., Ahilan, S., Arthur, S., Birkinshaw, S., Butler, D., Dawson, D., Everett, G., Fenner, R., Glenis, V., Kapetas, L., Kilsby, C., Krivtsov, V., Lamond, J., Maskrey, S., O'Donnell, G., Potter, K., Vercruyssen, K., Vilcan, T., & Wright, N. (2020). The blue-green path to urban flood resilience. *Blue-Green Systems*, 2(1), 28–45. <https://doi.org/10.2166/bgs.2019.199>
- Ojeda, A. O. (2017). *HIDROGEOMORFOLOGÍA Y GEODIVERSIDAD: EL PATRIMONIO FLUVIAL* (Issue Libro 1).
- Pappalardo, V., La Rosa, D., Campisano, A., & La Greca, P. (2017). The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning: A preliminary evaluation from a southern Italy case study. *Ecosystem Services*, 26, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.015>
- Programa APGEP-SENREM. (2002). *Proyecto PROCHILI. Plan de Gestión Ambiental de la Cuenca Metropolitana del río Chili, Arequipa* (First).
- Pulgar-Vidal, M. (2010). El Perú frente al cambio climático: respuestas nacionalmente apropiadas frente a un problema complejo y una gobernanza climática en crisis. *Agenda Internacional*, 17(28), 177–195. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/agendainternacional/article/view/3672>
- Qi, Y., Chan, F. K. S., Thorne, C., O'Donnell, E., Quagliolo, C., Comino, E., Pezzoli, A., Li, L., Griffiths, J., Sang, Y., & Feng, M. (2020). Addressing Challenges of Urban Water Management in Chinese Sponge Cities via Nature-Based Solutions. *Water*, 12(10), 2788. <https://doi.org/10.3390/w12102788>
- Quagliolo, C., Comino, E., & Pezzoli, A. (2021). Experimental Flash Floods Assessment Through Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Model: The Case Study of Ligurian Coastal Cities. *Frontiers in Water*, 3(May), 1–16. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.663378>

- Rivera, M., Vilchez, M., & Vela, J. (2018). Strengthening Capacity for Mitigation of Huaico (Flash Flood) Impacts in Peru Peligros por huaicos en la ciudad de Arequipa. *Taller Internacional Fortalecimiento de Capacidades Para Mitigar Los Impactos de Huaicos En Perú, Lima y Arequipa, Perú*, 15–19. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2589>
- Romero-Duque, L. P., Trilleras, J. M., Castellarini, F., & Quijas, S. (2020). Ecosystem services in urban ecological infrastructure of Latin America and the Caribbean: How do they contribute to urban planning? *Science of the Total Environment*, 728, 138780. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138780>
- Rosenzweig, B., Ruddell, B. L., McPhillips, L., Hobbins, R., McPhearson, T., Cheng, Z., Chang, H., & Kim, Y. (2019). Developing knowledge systems for urban resilience to cloudburst rain events. *Environmental Science & Policy*, 99, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.05.020>
- Ross, C. W., L. Prihodko, J. Y., Anchang, S. S., Kumar, W. J., & Hanan, N. P. (2018). *Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling*. ORNL DAAC. <https://doi.org/https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1566>
- Salmoral, G., Zegarra, E., Vázquez-Rowe, I., González, F., del Castillo, L., Saravia, G. R., Graves, A., Rey, D., & Knox, J. W. (2020). Water-related challenges in nexus governance for sustainable development: Insights from the city of Arequipa, Peru. *Science of the Total Environment*, 747, 141114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141114>
- Satterthwaite, D., Huq, S., Pelling, M., Reid, H., & Romero, P. (2007). Adapting to Climate Change in Urban Areas: The possibilities and constraints in low- and middle-income nations. In *Human Settlements Discussion Paper Series. Theme: Climate Change and Cities - 1* (Vol. 58, Issue 10). IIED. <https://doi.org/10.1071/AR06192>
- Shanableh, A., Al-Ruzouq, R., Yilmaz, A., Siddique, M., Merabtene, T., & Imteaz, M. (2018). Effects of Land Cover Change on Urban Floods and Rainwater Harvesting: A Case Study in Sharjah, UAE. *Water*, 10(5), 631. <https://doi.org/10.3390/w10050631>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., ... Douglass, J. (2019). The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. In *Αγαθη* (Vol. 8, Issue 2). <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66178>

- Torres Paguay, S. J. (2018). *Evaluación del Servicio Ecosistémico correspondiente a la producción de agua en la cuenca del río Guayllabamba utilizando el modelo computacional InVEST*.
- UNFCCC, & MINAM. (2016). *Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc3.pdf>
- Valverde, T., Meave, J., Carabias, J., & Cano- Santana, Z. (2005). *Ecología y medio ambiente* (G. Trujano (ed.); 1st ed.). Pearson Education.
- Vásquez, A. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63(1), 63–86. <https://doi.org/10.3987/COM-09-11865>
- Wu, C., Li, J., Wang, C., Song, C., Chen, Y., Finka, M., & La Rosa, D. (2019). Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133742>
- Wu, D., Wang, Y., Fan, C., & Xia, B. (2018). Thermal environment effects and interactions of reservoirs and forests as urban blue-green infrastructures. *Ecological Indicators*, 91(February), 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.054>
- Wu, X., Guo, S., Yin, J., Yang, G., Zhong, Y., & Liu, D. (2018). On the event-based extreme precipitation across China: Time distribution patterns, trends, and return levels. *Journal of Hydrology*, 562, 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.028>
- Yang, G., Yu, Z., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2020). How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 53(November 2019), 101932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101932>

ANEXOS

Anexo A – Encuesta de Servicios Ecosistémicos

ENCUESTA - SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Esta encuesta busca evaluar la importancia de los servicios ecosistémicos provistos por los ríos en su tramo urbano, es decir que colinde con áreas urbanas como ciudades.

Servicios de Provisión: son los bienes y servicios proporcionados por los ecosistemas al mantener que puedan ser aprovechados directamente por las comunidades ligadas a este.

Servicios de Regulación: son los beneficios obtenidos a partir de la interacción y regulación de las propiedades de los ecosistemas.

Servicios Culturales: relación directa que existe entre las comunidades y sus ecosistemas, donde los beneficios no materiales que estos brindan se convierten en parte esencial de la calidad de vida.

Servicios de Soporte: Indicándolos como los servicios necesarios para la producción de los demás servicios.

1. Según Ud, ¿Cuál sería el servicio ecosistémico de provisión más importante que provee un río en su tramo urbano?

	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante
Agua dulce	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Productos maderables	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Alimento: <i>Agricultura, ganadería, piscicultura</i>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Plantas cultivadas como fuente de energía.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Productos no maderables	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2. Según Ud, ¿Cuál sería el servicio ecosistémico de regulación más importante que provee un río en su tramo urbano?

	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante
Control de erosión y mantenimiento de suelo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Almacenamiento de nutrientes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Control de plagas y enfermedades	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Control de sequías	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Control de inundaciones y remoción en masa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Regulación de los regímenes de lluvia y el efecto de albedo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mantenimiento de la productividad de los ecosistemas acuáticos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono atmosférico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Calidad del agua	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Regulación del agua superficial, subterránea, subsuperficial y basal (Regulación de flujos de agua)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reducción de riesgos por crecientes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Confort térmico, reducción del uso de energía	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Regulación de clima local	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2021

	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante
Regulación de calidad de aire	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Protección contra incendios	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mantener las poblaciones y los hábitats.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Polinización	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Según Ud, ¿Cuál sería el servicio ecosistémico cultural más importante que provee un río en su tramo urbano?

	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante
Belleza escénica (Paisaje)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ecoturismo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Educación ambiental	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Salud física y mental	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Legado o herencia cultural	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Saberes tradicionales	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Interacciones espirituales e intelectuales	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Investigación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4. Según Ud, ¿Cuál sería el servicio ecosistémico de soporte más importante que provee un río en su tramo urbano?

	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante
Mantenimiento funcional de ecosistemas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Formación del suelo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Producción primaria	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ciclo de nutrientes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ciclo del agua	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Este contenido no está creado ni respaldado por Microsoft. Los datos que envíe se enviarán al propietario del formulario.

Microsoft Forms



Anexo B – Resultados de encuesta Internacional

Tabla 10 Resultados de encuesta de importancia de servicios ecosistémicos a nivel internacional

ENCUESTA DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS		Resultados					
ID	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE PROVISIÓN	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
1	Agua dulce	3.30%	10%	16.70%	6.70%	63.30%	100.00%
2	Productos maderables	26.70%	26.70%	33.30%	6.65%	6.65%	100.00%
3	Alimento: Agricultura, ganadería, piscicultura	3.30%	23.30%	26.70%	16.70%	30%	100.00%
4	Plantas cultivadas como fuente de energía.	20%	36.70%	30%	6.65%	6.65%	100.00%
5	Productos no maderables	10%	20%	43.40%	13.30%	13.30%	100.00%
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN		No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
6	Control de erosión y mantenimiento de suelo	6.70%	10%	33.30%	3.30%	46.70%	100.00%
7	Almacenamiento de nutrientes	0%	13.30%	46.70%	10%	30%	100.00%
8	Control de plagas y enfermedades	0%	20.00%	33.30%	20%	26.70%	100.00%
9	Control de sequías	0%	10.00%	36.70%	13.30%	40%	100.00%
10	Control de inundaciones y remoción en masa	3.30%	0.00%	13.30%	6.70%	76.70%	100.00%
11	Regulación de los regímenes de lluvia y el efecto de albedo	0%	6.70%	26.70%	23.30%	43.30%	100.00%
12	Mantenimiento de la productividad de los ecosistemas acuáticos	0%	3.30%	26.70%	23.30%	46.70%	100.00%
13	Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono	0%	13.30%	16.70%	26.70%	43.30%	100.00%
14	Calidad del agua	0%	6.70%	10%	23.30%	60%	100.00%

15	Regulación del agua superficial, subterránea, subsuperficial y basal	0%	6.67%	20%	16.67%	56.66%	100.00%
16	Reducción de riesgos por crecientes	0%	6.70%	10%	23.30%	60%	100.00%
17	Confort térmico, reducción del uso de energía	0%	3.33%	10%	33.33%	53.34%	100.00%
18	Regulación de clima local	0%	0%	6.70%	30%	63.30%	100.00%
19	Regulación de calidad de aire	0%	10%	16.70%	33.30%	40%	100.00%
20	Protección contra incendios	0%	26.67%	26.67%	20.00%	26.66%	100.00%
21	Mantener las poblaciones y los hábitats.	0%	0%	16.70%	13.30%	70%	100.00%
22	Polinización	0%	10%	33.30%	30%	26.70%	100.00%

	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS CULTURALES	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
23	Belleza escénica (Paisaje)	0%	3.30%	6.70%	20%	70%	100.00%
24	Ecoturismo	0%	6.70%	40%	13.30%	40%	100.00%
25	Educación ambiental	0%	3.33%	3.33%	3.34%	90%	100.00%
26	Salud física y mental	0%	0%	10%	10%	80%	100.00%
27	Legado o herencia cultural	0%	0%	6.67%	26.67%	66.66%	100.00%
28	Saberes tradicionales	0%	3.30%	16.70%	36.70%	43.30%	100.00%
29	Interacciones espirituales e intelectuales	0%	0%	20%	23.30%	56.70%	100.00%
30	Investigación	0%	6.70%	10%	23.30%	60%	100.00%

	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE SOPORTE	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
31	Mantenimiento funcional de ecosistemas	0%	0%	3.40%	20.70%	75.90%	100.00%
32	Formación del suelo	4%	28.55%	25%	25%	17.85%	100.00%
33	Producción primaria	0%	32.10%	35.70%	17.90%	14.30%	100.00%
34	Ciclo de nutrientes	0%	11.13%	22.23%	25.93%	40.73%	100.00%
35	Ciclo del agua	0%	0%	13.80%	13.80%	72.40%	100.00%
36	Ciclo de sedimentos	0%	0%	25%	17.90%	57.10%	100.00%

Anexo C – Resultados de encuesta Local

Tabla 11 Resultados de encuesta de importancia de servicios ecosistémicos a nivel local

ENCUESTA DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS		Resultados					
ID	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE PROVISIÓN	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
1	Agua dulce		5.00%			95.00%	100.00%
	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
2	Control de inundaciones y remoción en masa	0.00%	20.00%	15.00%	10.00%	55.00%	100.00%
3	Regulación de los regímenes de lluvia y el efecto de albedo	0%	5.00%	40.00%	15.00%	40.00%	100.00%
4	Mantenimiento de la productividad de los ecosistemas acuáticos	0%	0.00%	30.00%	20.00%	50.00%	100.00%
5	Purificación del aire a través de la captura y almacenamiento de carbono	0%	5.00%	15.00%	40.00%	40.00%	100.00%
6	Calidad del agua			15%	10.00%	75%	100.00%
7	Regulación del agua superficial, subterránea, subsuperficial y basal			20%	10.00%	70.00%	100.00%
8	Reducción de riesgos por crecientes		10.00%	20%	25.00%	45.00%	100.00%
9	Confort térmico, reducción del uso de energía		20.00%	30%	20.00%	30%	100.00%
10	Regulación de clima local			25%	10.00%	65.00%	100.00%
11	Regulación de calidad de aire		5%	30.00%	25%	40.00%	100.00%
12	Mantener las poblaciones y los hábitats.			10.00%	15.00%	75%	100.00%
	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS CULTURALES	No	Poco	Importante	Medianamente	Muy	TOTAL

		importante	Importante		importante	importante	
13	Belleza escénica (Paisaje)			5.00%	20%	75%	100.00%
14	Educación ambiental		5.00%	25.00%	15.00%	55%	100.00%
15	Salud física y mental			25%	35%	40%	100.00%
16	Legado o herencia cultural			40.00%	5.00%	55.00%	100.00%
17	Saberes tradicionales		10.00%	25.00%	20.00%	45.00%	100.00%
18	Interacciones espirituales e intelectuales	5%	10%	35%	20.00%	30.00%	100.00%
19	Investigación				30.00%	70%	100.00%

	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE SOPORTE	No importante	Poco importante	Importante	Medianamente importante	Muy importante	TOTAL
20	Mantenimiento funcional de ecosistemas			15.00%		85.00%	100.00%
21	Ciclo de nutrientes		5.00%	20%	30%	45.00%	100.00%
22	Ciclo del agua			20.00%	10.00%	70.00%	100.00%
23	Ciclo de sedimentos		5.00%	25.00%	30.00%	40.00%	100.00%

Anexo D – Validación de capa de uso de suelos

Tabla 12 Resultados de validación de capa de uso de suelos

Año	Precisión	Río	Monte ribereño	Cardonal	Agrícola	Urbano	Puyal
1984	PA (%)	74.03	86.97	95.89	97.49	95.18	75.34
	UA (%)	69.62	80.07	86.35	95.46	99.02	97.86
	PT (%)	93.35					
1988	PA (%)	81.95	89.27	97.80	98.97	97.88	90.03
	UA (%)	95.60	91.19	95.79	96.92	98.17	97.42
	PT (%)	96.75					
1992	PA (%)	78.55	78.29	88.25	94.94	99.18	87.94
	UA (%)	43.21	93.87	94.86	96.86	97.41	69.69
	PT (%)	92.96					
1996	PA (%)	77.73	89.69	99.34	96.68	96.74	90.51
	UA (%)	65.92	87.90	95.29	97.09	98.58	98.72
	PT (%)	95.90					
2000	PA (%)	78.48	88.03	98.30	95.91	94.79	84.91
	UA (%)	69.33	90.74	91.71	94.55	98.14	97.85
	PT (%)	94.20					
2004	PA (%)	75.04	84.41	94.46	97.17	96.85	93.02
	UA (%)	77.64	85.61	96.52	95.18	98.52	89.09
	PT (%)	94.93					
2008	PA (%)	69.88	85.18	96.06	97.21	94.52	93.45
	UA (%)	75.84	83.24	96.45	93.14	98.41	94.34
	PT (%)	94.44					
2013	PA (%)	77.90	91.39	96.21	97.80	94.04	86.86
	UA (%)	74.21	95.97	97.63	93.74	96.30	91.75
	PT (%)	94.66					
2017	PA (%)	96.67	91.63	97.89	98.88	98.73	91.00
	UA (%)	84.54	96.97	96.67	98.54	98.82	96.95
	PT (%)	97.85					
2022	PA (%)	99.47	90.65	96.23	97.33	98.29	92.90
	UA (%)	84.95	95.86	97.85	98.85	98.13	88.99
	PT (%)	97.30					

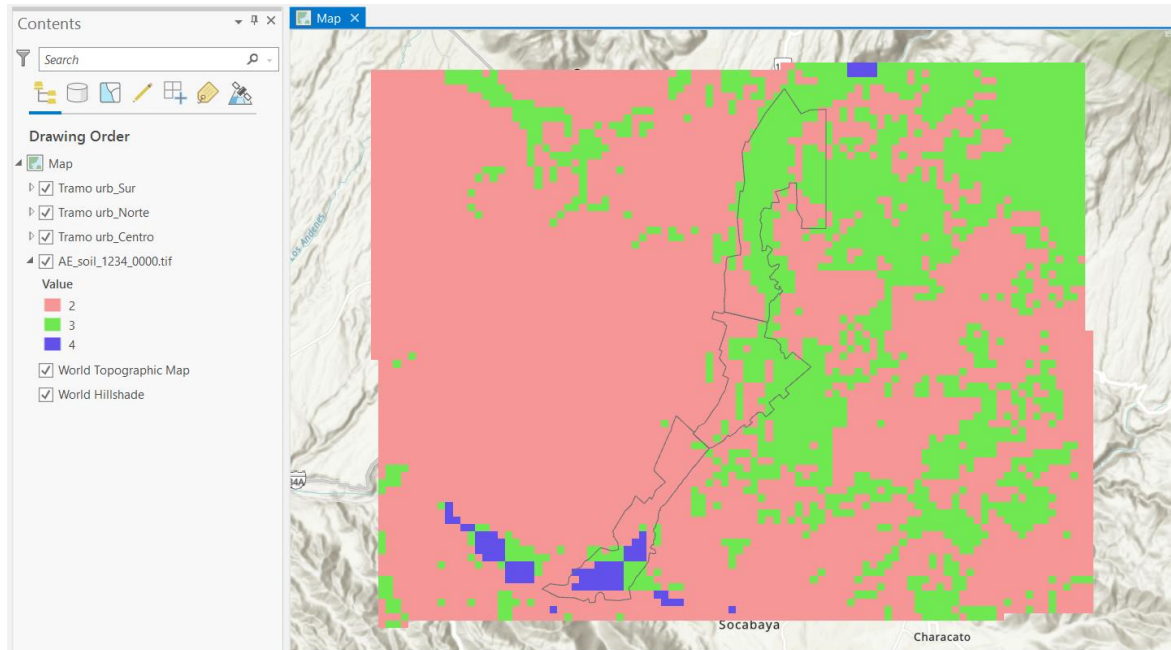
PA: producer's accuracy

UA: user's accuracy

PT: precisión total

Anexo E – Capa de HSG

Figura 11 Vista de capa de grupos hidrológicos de suelos para el área de estudio



Anexo F – Vista de *inputs* al modelo InVEST

Figura 12 Inputs al modelo InVEST

Parameter	Value	Status
Workspace	Urban Flood Risk\Resultados sin built infrastructure	✓
File Suffix (optional)	_2017	✓
Area Of Interest	AE_1/AE_tramo_urb/Watershed_gpkg/Tramo_urb_chili.gpkg	✓
Rainfall Depth (mm)	225	✓
Land Use/Land Cover	d Risk\UFR_AE_1\AE_LULC_2017\luc_2017_classified.tif	✓
Biophysical Table	1\Tabla_biofisica\reclass_biophysicaltable_nodata.csv	✓
Soil Hydrologic Group	rban Flood Risk/UFR_AE_1/SOIL_R/AE_soil_1234_0000.tif	✓
Built Infrastructure (optional)	vector	✓
Damage Loss Table	csv	✓