



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO**

**Evaluación del efecto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el servicio
ecosistémico hídrico y la viabilidad de su implementación en la microcuenca
interurbana Río Torres, San José, Costa Rica**

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

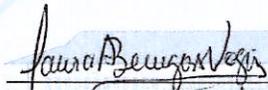
Aurorita Yessenia Espinal Giron

**Turrialba, Costa Rica
2022**

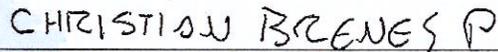
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

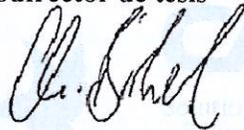
FIRMANTES:



Laura Benegas Negri, Ph.D.
Codirectora de tesis



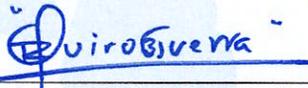
Christian Brenes Pérez, M.Sc.
Codirector de tesis



Christian Birkel Dostal, Ph .D.
Miembro Comité Consejero



Cornelis Prins, MA
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado



Aurorita Yesenia Espinal Girón
Candidata

DEDICATORIA

A mis padres, Dolia Girón y Julián Espinal por tanto amor, por alimentar la motivación de continuar con mi crecimiento académico. Gracias por creer en mí y por apoyarme a mí y a mis hermanos.

A mi hermano Maycol, agradezco su apoyo a la distancia, gracias por alegrarse y sentirse orgulloso de mis logros, espero le sirva de ejemplo de que con esfuerzo todo se puede lograr.

A mi hermanito Juliancito, que siempre será mi mayor motivo de alegría, inspiración y gratitud. Quien contó los meses, los días y las horas para que pueda volver a su lado. Del amor que nació en ti, nació en mí la valentía para enfrentar cada etapa de mi vida.

A mis sobrinitos, Elenita y Maycol, que me impulsan a ser mejor cada día, por ser ese motivo de esperanza que alienta nuestras vidas.

A mis abuelitos, Aurora Hernández y Erasmo Espinal, por sentirse orgullosos de mis logros, de ustedes aprendí con humildad sus principios, valores y la perseverancia. A mi tío abuelo Tulio Hernández por siempre motivarme con sus sabios consejos y por todas sus oraciones.

A mis ángeles en el cielo, mis abuelitos Fidelina Hernández y Fausto Girón, que cuidan mi camino y me guían con su luz en este recorrido por la vida.

A mi familia y amigos, que desde la distancia dieron sus muestras sinceras de apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque tu amor y bondad no tienen fin, me has permitido crecer de diversas formas y con esta maravillosa experiencia académica me has demostrado que con superación, humildad y sacrificio puedo convertirme en la persona que tanto soñé, y por haberme otorgado una familia maravillosa que ha sido mi gran bendición.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), por el apoyo económico que me ha concedido todo lo necesario para tener la oportunidad de crecer profesionalmente.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), por abrirnos sus puertas, por prevalecer aspectos de la naturaleza que son importantes para formar a sus profesionales, y al personal administrativo, por acogernos muy cálidamente a todos los estudiantes en este extraordinario lugar.

A los docentes, por su dedicación en enseñarnos a través de sus experiencias profesionales y personales, y por su lado humano al servicio de los estudiantes.

A mis mentores, la profesora Laura Benegas por su disposición constante y apoyo incondicional cuando más lo necesité, al profesor Christian Brenes por sus valiosos aportes durante el proceso, al profesor Kees Prins por su apoyo, motivación y esfuerzo, y al profesor Christian Birkel por su enérgica orientación y acompañamiento, a todos, fue un honor tenerles en mi Comité Consejero de tesis.

A la Sra. Beatriz Fernández y al Sr. Sergio Feoli, por abrirme las puertas del Comité Local del río Torres y por el apoyo que me brindaron durante este proceso de investigación.

A mis compañeros de maestría que se volvieron amigos especiales, Anita, Andrea, Yefrin y Javi, gracias por ser un ejemplo profesional excepcional, del que aprendí mucho y que motivan al que esté a su alrededor, gracias por la amistad que nos hizo disfrutar muchas experiencias inolvidables.

A Sirey Ulloa, mi amiga que depositó su confianza y creyó en mí, siempre estuvo para apoyarme y dar esas palabras de aliento durante esta etapa, gracias por todo tu cariño sincero.

A mis amigos del CATIE, de los que también aprendí tanto, siempre tendrán un lugar especial en mi corazón. Gracias por permitirme deleitarnos juntos en este proceso.

CONTENIDO

RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA	6
A. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	6
B. GEOGRAFÍA	7
C. VARIABLES BIOFÍSICAS	7
D. ACTIVIDADES SOCIO PRODUCTIVAS	8
E. PROYECCIONES DE POBLACIÓN	8
F. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	8
2.1 Evaluación del efecto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el servicio ecosistémico hídrico mediante la modelación hidrológica con iTree-Hydro Plus	9
2.1.1 Identificación y obtención de los parámetros requeridos para la modelación hidrológica.	9
2.1.2 Relación de usos y cobertura del suelo con los parámetros requeridas por i-Tree Hydro Plus.....	12
2.1.3 Descripción del modelo i-Tree Hydro Plus	14
2.1.4 Combinación herramientas computacionales para el uso de i-Tree Hydro Plus	14
2.1.5 Estructuras de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN).....	15
2.1.6 Diseño de escenarios de cobertura del suelo para la modelación.....	19
2.1.7 Calibración del caudal predicho versus el caudal observado y la determinación de la relación lluvia-escorrentía.....	25
2.2 Identificación de la viabilidad de implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), a través de actores locales de la microcuenca	27
2.2.1 Proceso consultivo con los actores claves sobre las SbN por modelar	27
2.2.2 Procesamiento y análisis de resultados de las encuestas	28
2.2.3 Proceso de validación con los actores claves sobre las SbN modeladas	28
3. RESULTADOS	29
3.1 Comportamiento de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el servicio ecosistémico hídrico de la microcuenca interurbana	29
3.1.1 Parámetros requeridos para la modelación hidrológica	29
3.1.2 Potencial de generación de escorrentías en la microcuenca en estado actual del balance hídrico.	29
3.1.3 Escorrentía evitada asociada a los cambios en la cubierta terrestre en escenarios alternativos	31
3.1.4 Comparación de los tipos de flujo por cada infraestructura verde modelada	32
3.1.5 Resultados de la calibración del modelo.....	34
3.2 Potencial de aceptación de los resultados del modelado hidrológico para su implementación	35
3.2.1 Proceso de consulta con actores claves de la microcuenca.....	35
3.2.2 Proceso validación social	38
4. DISCUSIÓN	41
4.1 DESEMPEÑO DEL MODELO I-TREE HYDRO PLUS PARA REPRESENTAR LAS CARACTERÍSTICAS HÍDRICAS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TORRES	41

4.2	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA A PARTIR DEL BALANCE HÍDRICO OBTENIDO PARA LA MICROCUENCA RÍO TORRES.....	42
4.3	ESCORRENTÍA EVITADA POR LA IMPLEMENTACIÓN DE SBN.....	43
4.4	POTENCIAL DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN FUTURA DE SBN.....	45
5.	CONCLUSIONES.....	49
6.	RECOMENDACIONES.....	50
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	51
8.	ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Insumos utilizados para la investigación.....	11
Cuadro 2.	Tipos de usos y cobertura del suelo y clasificación de parámetros para i-Tree Hydro Plus.....	13
Cuadro 3.	Clasificación de usos del suelo según los parámetros requeridos por i-Tree Hydro Plus.....	13
Cuadro 4.	Infraestructuras verdes consideradas en la modelación hidrológica y diseño esquemático de la representación de los movimientos del agua a través de la estructura. ..	16
Cuadro 5.	Parámetros de uso y cobertura del suelo del caso base.....	19
Cuadro 6.	Descripción de los escenarios de IV, cobertura de árboles y alta urbanización	21
Cuadro 7.	Parámetros de uso del suelo para los escenarios con IV.....	22
Cuadro 8.	Parámetros de suelo obtenidos para determinar la relación de lluvia-escorrentía en la microcuenca.....	27
Cuadro 9.	Resultados de los componentes del flujo para el caso base.....	31
Cuadro 10.	Resultados de los componentes del flujo en escenarios con implementación de IV.	31
Cuadro 11.	Sectores del CL que participación en las encuestas aplicadas.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Representación esquemática de la gama de Sbn. fuente: tomada y modificada de (eggermont <i>et al.</i> 2015).....	3
Figura 2.	Ubicación geográfica del área de estudio, microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.	6
Figura 3.	Distribución cantonal en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica. ...	7
Figura 4.	Proceso metodológico de la investigación.....	8
Figura 5.	Ubicación de las estaciones meteorológica utilizadas es el estudio.	9
Figura 6.	Herramientas computacionales utilizadas en el proceso de la modelación hidrológica.	15
Figura 7.	Uso del suelo para la modelación del caso base de la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.	20

Figura 8. Clasificación de distritos por categoría de IDS en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.	21
Figura 9. Representación de escenarios con implementación de celdas de biorretención, jardines de lluvia y zanjas de infiltración en distritos con IDS > 73.72% en la microcuenca el río Torres, San José, Costa Rica.....	22
Figura 10. Representación de escenarios con implementación de techos verdes en distritos con IDS > 73.72% en la microcuenca el río Torres, San José, Costa Rica.....	23
Figura 11. Representación de escenarios con implementación de pavimentos permeables en distritos con IDS > 73.72% en la microcuenca el río Torres, San José, Costa Rica.....	23
Figura 12. Representación de escenario con incremento de cobertura de árboles en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.	24
Figura 13. Representación del escenario con aumento desproporcionado de urbanización en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.	25
Figura 14. Proceso para determinar la viabilidad de la implementación de IV en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.	28
Figura 15. Régimen del balance hídrico anual generado para el caso base en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.....	29
Figura 16. Cantidades de flujos generados en el balance hídrico del caso base de la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.	30
Figura 17. Componentes de los flujos generados por escenarios modelados con IV en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.	32
Figura 18. Generación de flujo base por escenario modelado con IV, incremento de cobertura de árboles y alta urbanización en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.	32
Figura 19. Generación de flujo permeable por escenario modelado con IV, incremento de cobertura de árboles y alta urbanización en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.	33
Figura 20. Generación de flujo impermeable por escenario modelado con IV, incremento de cobertura de árboles y alta urbanización en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.	33
Figura 21. Comportamiento del caudal simulado en escenario de supuesto de cobertura del suelo y comportamiento del caudal simulado en condiciones reales de la cobertura del suelo en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.	34
Figura 22. Precipitación y comportamiento del caudal simulado en relación con el caudal observado de enero a julio del 2022 en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica. .	35
Figura 23. Buenas prácticas actualmente desarrolladas por el CL del río Torres.....	36
Figura 24. Evaluación de escenarios por el cl para la implementación de escenarios en la modelación hidrológica.....	37
Figura 25. Sistematización de la viabilidad de implementación de IV en la microcuenca del río torres.	40
Figura 26. Vista desde la parte alta de la microcuenca, localidad de rancho redondo, goicoechea.....	59
Figura 27. Pasturas localizadas en la parte alta de la microcuenca, localidad de rancho redondo, goicoechea.....	59

Figura 28. Desembocadura de la microcuenca, parte baja de la microcuenca localizada en la planta hidroeléctrica belén.	59
Figura 29. Sitio de aforado del río torres, localizado en el sector “los conejos” en el vecindario de Rohrmoser.	59
Figura 30. Representación de cause principal desde la parte alta media y media baja de la microcuenca río Torres y punto de aforo.	60
Figura 31. Área recreativa ubicada en el margen del río Torres, localidad de Salitrillos...	60
Figura 32. Huerta urbana comunal ubicada en el sector de Salitrillos a un costado del cauce principal.	60
Figura 33. Infraestructura verde de tipo biojardinera para el tratamiento de aguas residuales del edificio Órganos de Desconcentración Máxima del Banco Central.	61
Figura 34. Montaje del equipo OT MF pro para la medición del caudal del río.	61
Figura 35. Reunión con los actores del cl para presentar la propuesta de investigación y aplicación de encuestas.	61
Figura 36. Giras de reconocimiento de la microcuenca del río torres.	62
Figura 37. Hoja de resultado de la medición del caudal del río proporcionada por el aparato ott mf pro en formato .TSV (valores separados por tabulaciones, por sus siglas en inglés).	63
Figura 38. Encuesta aplicada a los actores claves de la microcuenca.	64

LISTA DE ACRÓNIMOS

AbE	Adaptación basada en Ecosistemas
ASCII	Código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información ¹
CBIRTRB	Corredor Biológico Interurbano Río Torres Reserva de la Biósfera
CCP	Centro Centroamericano de Población
CIGEFI	Centro de Investigaciones Geofísicas
CODS	Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina
CLI	Interfaz de Línea de Comandos ¹
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
CNFL	Compañía Nacional de Fuerza y Luz
CRTM05	Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ¹
DCIA	Área Impermeable Directamente Conectada ¹
DIGECA	Dirección de Gestión de Calidad Ambiental
GAM	Gran Área Metropolitana
GA	Green-Ampt
GIZ	Sociedad Alemana de Cooperación Internacional ²
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario ¹
IBS	Índice Biótico del Suelo
IDS	Índice de Desarrollo Social
IMN	Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
INVU	Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo
IV	Infraestructura verde
DEM	Modelo de Elevación Digital ¹
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
MINAE	Ministerio del Ambiente y Energía
MINAET	Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones
MIVAH	Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica ¹
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PGAI	Programas de Gestión Ambiental Institucional
PNCB	Programa Nacional de Corredores Biológicos
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SIMOCUTE	Sistema Nacional de Monitoreo de Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible
SWMM	Modelo de Gestión de Aguas Pluviales ¹
UCI	Universidad para la Cooperación Internacional
UCR	Universidad de Costa Rica
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
UNA	Universidad Nacional de Costa Rica
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos ¹
WWAP	Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos ¹

¹ Por sus siglas en inglés.

² Por sus siglas en alemán.

Evaluación del efecto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el servicio ecosistémico hídrico y la viabilidad de su implementación en la microcuenca interurbana Río Torres, San José, Costa Rica

Aurorita Espinal Giron (aurorita.espinal@catie.ac.cr)

Laura Benegas Negri (laura.benegas@catie.ac.cr)

Christian Brenes (christian.brenes@catie.ac.cr)

Kess Prins (prins@catie.ac.cr)

Christian Birkel (christian.birkel@ucr.ac.cr)

RESUMEN

La implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) de tipo infraestructuras verdes (IV) genera efectos positivos en el servicio ecosistémico hídrico en un contexto urbano, principalmente, para la mitigación de los impactos de las aguas pluviales en las ciudades. Las prácticas de IV para maximizar la infiltración como las celdas de biorretención, techos verdes, jardines de lluvia, pavimentos permeables y zanjas de infiltración ofrecen una perspectiva óptima para tratar grandes volúmenes de escorrentía que permitan abordar diferentes problemáticas ambientales y sociales de las poblaciones radicadas en espacios altamente urbanizados.

Para simular estos efectos, se realizó una modelación hidrológica para cada una de las IV con el modelo i-Tree Hydro Plus. La principal función del modelo es cuantificar la generación de escorrentías ante eventos de precipitación como respuesta de la microcuenca cuando se tienen transformaciones efectivas para tratar escorrentías impermeables. Se elaboraron cinco escenarios futuros con las IV, un escenario con incremento de cobertura de árboles y uno pesimista con aumento de urbanización desorganizado.

El análisis de la viabilidad de la implementación de las IV modeladas se realizó mediante la consulta con actores locales de la microcuenca. Los resultados mostraron la efectividad de la disminución de las escorrentías cuantificando que las celdas de biorretención, techos verdes, jardines de lluvia, pavimentos permeables y zanjas de infiltración, en promedio, por cada escenario, reducen al 5% el flujo impermeable con respecto al caso base (32%) propiciando el incremento del flujo permeable y flujo base.

El escenario de incremento de cobertura de árboles en las condiciones de esta investigación tuvo un comportamiento similar al caso base, lo que indica que los esfuerzos en esta alternativa estarían generando un impacto reducido en el flujo de escorrentía. Por su parte, el escenario de incremento descontrolado de urbanización mostró que el flujo impermeable se incrementa a un 78%; este demuestra problemas severos de inundaciones como resultado de dicho escenario. Además, los actores locales coincidieron en la viabilidad de los jardines de lluvia y la plantación de árboles (42% de las opiniones). Este tipo de IV se considera excelente para implementar en mayor medida, tomando en cuenta las acciones que ya se han venido realizando en la microcuenca. En cambio, los actores claves indicaron que la viabilidad para implementar los techos verdes era deficiente (42% de las opiniones). Además, existe viabilidad en la implementación de SbN, dado que estas están incluidas en la agenda de muchos instrumentos normativos de planificación y gestión urbana en Costa Rica.

Palabras claves: infraestructura verde, cuencas urbanas, modelo i-Tree Hydro Plus, modelación hidrológica, percepción social de las SbN

Assessment of the effect of Nature-Based Solutions (NBS) on the water ecosystem service and the viability of their implementation in the Torres River interurban micro-basin, San José, Costa Rica.

Aurorita Espinal Giron (aurorita.espinal@catie.ac.cr)

Laura Benegas Negri, (laura.benegas@catie.ac.cr)

Christian Brenes (christian.brenes@catie.ac.cr)

Kess Prins (prins@catie.ac.cr)

Christian Birkel (christian.birkel@ucr.ac.cr)

ABSTRACT

The implementation of Green Infrastructure (GI) Nature-Based Solutions (NBS) generates positive effects on the water ecosystem service in an urban context, mainly for the mitigation of stormwater impacts in cities. Green infrastructure practices to maximize infiltration such as bioretention cells, green roofs, rain gardens, permeable pavements and infiltration trenches offer an optimal perspective to treat large volumes of runoff to address different environmental and social issues of populations living in highly urbanized spaces.

To simulate these effects, hydrological modeling was performed for each of the IV with the i-Tree Hydro Plus model. The main function of the model is to quantify the generation of runoff from precipitation events as a response of the micro-basin when there are effective transformations to treat impermeable runoff. Five future scenarios were developed with the IV, one scenario with increased tree cover and a pessimistic scenario with increased disorganized urbanization. The analysis of the feasibility of implementing the modeled IV was done through consultation with local stakeholders in the micro-basin. The results showed the effectiveness of runoff reduction by quantifying that bioretention cells, green roofs, rain gardens, permeable pavements, and infiltration ditches, on average for each scenario reduce impervious flow by 5% with respect to the base case (32%), leading to an increase in permeable flow and base flow. The scenario of increased tree cover under the conditions of this research had a similar behavior to the base case, indicating that the efforts in this alternative would be generating a reduced impact on runoff flow. The scenario of uncontrolled increase of urbanization showed that the impervious flow increases to 78%, this result demonstrates severe flooding problems as a result of this scenario. Local stakeholders agreed on the feasibility of rain gardens and tree planting (42% of opinions). This type of IV is considered excellent to implement to a greater extent, taking into account the actions that have already been taking place in the micro-basin. In contrast, key stakeholders indicated that the feasibility of implementing green roofs was poor (42% of opinions). In addition, there is feasibility in the implementation of BNS, given that they are included in the agenda of many regulatory instruments for urban planning and management in Costa Rica.

Key words: green infrastructure, urban watersheds, i-Tree Hydro Plus model, hydrological modeling, social perception of NBS

1. INTRODUCCIÓN

El estudio en cuencas hidrográficas urbanas ha ganado mayor atención en los últimos años, en virtud de la necesidad de analizar factores ambientales, especialmente el cambio de uso en la cobertura del suelo y su relación con la variabilidad climática (Aboelnour *et al.* 2019). Dichas condiciones indican que existe una relación estrecha entre el cambio climático y la ciudades (Sánchez Rodríguez 2013). En ese sentido, continuamente, se dan a conocer más pruebas de la creciente crisis de cambio climático e inseguridad hídrica (Ochoa *et al.* 2022).

En la actualidad, en las ciudades radica más de la mitad de la población mundial con una tendencia marcada de crecimiento continuo de población en las décadas futuras (FAO 2018). Para el caso de América Latina, desde 1950, los niveles de urbanización han aumentado, dado que el 80% de la población vive en zonas urbanas (BBVA 2017). Mientras tanto, se ha determinado que, en América del Norte y Central, el 80% de la población vive en ciudades (Kupriyanov 2009). En tal caso, los procesos hidrológicos en las cuencas hidrográficas urbanizadas se alteran significativamente debido a la actividad humana; por ejemplo, las actividades de construcción de infraestructura gris dan como resultado una alta proporción de superficies impermeables conectadas que evitan la infiltración natural del agua en el suelo, así como disminuyen la evapotranspiración (Sokac 2019), generan déficits en los sistemas de drenaje convencionales (Pérez Rubi y Hack 2021) que causan daños ambientales por contaminantes y por impactos físicos de caudales más altos que las cuencas menos urbanizadas (Wild *et al.* 2002).

Las cuencas hidrográficas urbanas son aquellas ubicadas donde se originan los procesos urbanísticos de asentamientos humanos, con actividades sociales, económicas, políticas y culturales, que se apoyan en diferentes sistemas tecnológicos artificiales y se desarrollan a costa del sistema natural (Agredo Cardona 2013). Por ello, al hablar de hidrología urbana, se está pensando en el estudio de características diferentes a las de una cuenca natural, ya que se disminuye su capacidad de proveer servicios ecosistémicos a una determinada población. De acuerdo con el Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina y el Caribe (CODS), los servicios ecosistémicos urbanos son aquellos que se producen en espacios propiamente urbanos; es decir, los que se insertan dentro de las áreas urbanas continuas definidas por una estructura física de la ciudad y no solo por su identificación administrativa (Inostroza *et al.* 2020). Por lo tanto, las ciudades y los beneficios de la naturaleza están estrechamente relacionadas porque de ahí surge el reconocimiento de los procesos en los ecosistemas que determinan el bienestar humano (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio 2006) (Inostroza *et al.* 2020).

Según el análisis realizado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) para América Latina, el enfoque ecosistémico de recurso hídrico se ha venido consolidando como una estrategia que integra las diferentes dimensiones del desarrollo, tomando como eje articulador la gestión de los ecosistemas, además del fortalecimiento de capacidades y la inversión en infraestructura natural (Guerrero *et al.* 2006). El uso y la cobertura de la tierra juegan un papel central en la definición de la capacidad de los ecosistemas terrestres para proporcionar servicios ambientales (Grau *et al.* 2008). No obstante, el cambio de uso de suelo es uno de los factores biofísicos más determinantes en la regulación hídrica y sus efectos están siendo poco estudiados (Jullian *et al.* 2018).

La Gran Área Metropolitana (GAM) es reconocida como el centro de aglomeración de actividades económicas más importantes de Costa Rica, caracterizada por la concentración

de funciones urbanas de gestión, de industria y comercio a diferentes escalas (Arias Ramírez y Sánchez Hernández 2012). La composición ambiental de las zonas verdes en la GAM se encuentra desarticulada y distribuida de manera aleatoria, debido a la pavimentación de las principales calles y avenidas que no permiten enlazar estos diferentes espacios; por lo tanto, la carencia de espacios verdes para la infiltración en combinación con la pavimentación masiva del suelo genera un régimen pluviométrico alto convirtiéndose en un patrón de riesgo ambiental (MIVAH 2016).

De acuerdo con las proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en conjunto con el Centro Centroamericano de Población (CCP), Costa Rica seguirá creciendo hasta acercarse a los 6,2 millones de habitantes en el 2063 (INEC 2013); esto significa que habrá más demanda de servicios ecosistémicos en el país. Además, estimaciones realizadas sobre el crecimiento de la superficie urbana en la GAM indican que el ritmo de crecimiento del área urbana aumentó en promedio 430 ha anualmente en el periodo de 1997-2010; mientras que, de 2010 a 2018, el crecimiento urbano disminuyó en 195 ha anualmente y es explicado por el agotamiento de los terrenos disponibles y el aumento de construcciones verticales; como consecuencia, existe un aumento en la densidad poblacional con menor dispersión y mayor compacidad (Arias Ramírez y Sánchez Hernández 2012; Sánchez Hernández 2018). Un claro ejemplo es la rápida transición rural-urbana de la GAM durante el último siglo, la cual ha generado intensos impactos ambientales a lo largo de esta región y están asociados, principalmente, al ordenamiento territorial mal planificado (Quesada-Román *et al.* 2021).

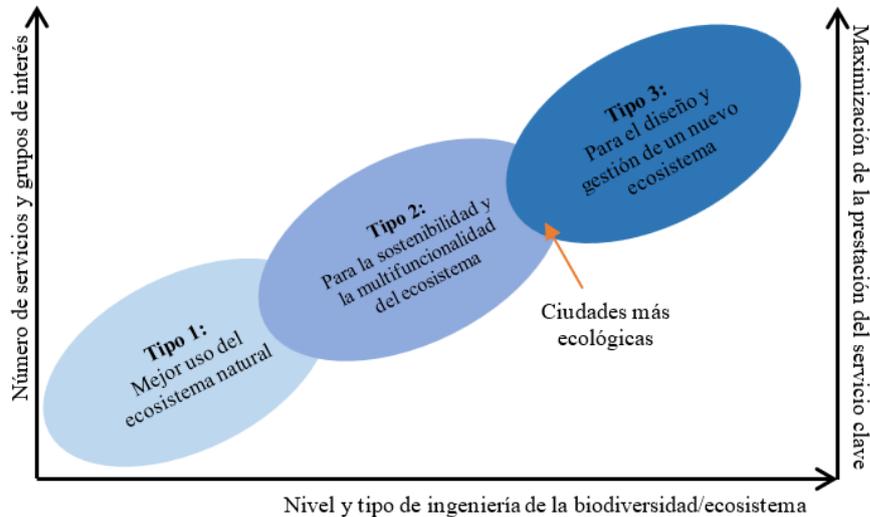
Las alternativas para responder a los diversos desafíos que enfrenta la sociedad, como el cambio climático, la seguridad alimentaria o el riesgo a desastres, se pueden enfrentar bajo el concepto nuevo que abarca todas aquellas acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen: las llamadas Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) (UICN 2017). La FAO (2018) señala que las SbN son la herramienta clave para alcanzar el desarrollo urbano sostenible. A su vez, se les ha otorgado una serie de enfoques complementarios como la Adaptación basada en Ecosistemas (AbE), estos proceden de diferentes disciplinas; sin embargo, tienen un interés en común por utilizar las funciones de los ecosistemas para resolver los problemas que enfrenta la sociedad, en lugar de utilizar soluciones convencionales (ONU-WWAP 2018). Por lo tanto, se necesita un medio para realizar conjeturas sobre las mediciones disponibles tanto en el espacio como en el tiempo con el fin de evaluar el posible impacto de los futuros cambios hidrológicos (Beven 2012; Birkel y Barahona 2019).

El concepto nuevo de SbN que abarca todas aquellas acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen (UICN 2016) fue definido por la UICN mediante un proceso consultivo (Cohen-Shacham *et al.* 2016). No obstante, la característica determinante de una SbN no es si se trata de un ecosistema “natural”, sino que los procesos naturales son proactivamente manejados, de tal manera que se pueda anticipar para lograr un objetivo relacionado con el agua (ONU-WWAP 2018).

La ONU y el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) revelan que las SbN son aplicadas cada vez más en la gestión integrada y planificación de las cuencas urbanas para la conservación y restauración ecológica, con el fin de prevenir problemas de inundaciones o para la preservación de caudales en una cuenca (ONU-WWAP 2018). En el Congreso Nacional del Medio Ambiente celebrado en Madrid en 2018, se distinguieron tres tipos de SbN (Tipo 1. Intervención mínima en ecosistemas, Tipo 2. Algunas intervenciones en ecosistemas y paisajes y la de Tipo 3. Gestión de los ecosistemas de forma extensa) (CONAMA 2018). Estos tipos surgen de la clasificación realizada por Eggermont *et al.*

(2015) y otros colaboradores en el 2015, que generan un esquema de la evolución de estos tipos de SbN:

Figura 1. Representación esquemática de la gama de SbN. Fuente: tomada y modificada de (Eggermont *et al.* 2015)



Los tres tipos difieren en el nivel ingeniería o gestión aplicada; sin embargo, no se puede decir que el Tipo 3 es “mejor” que el tipo 1, ya que los tres tipos han surgido de la existencia del otro, es decir, son complementarios.

La Comisión Europea (2013), en el marco de la Estrategia de Infraestructura Verde de la UE: «define las infraestructuras verdes de la siguiente manera: "una red estratégicamente planificada de áreas naturales y seminaturales con otras características ambientales diseñadas y gestionadas para ofrecer una amplia gama de servicios de los ecosistemas"».

La modelación hidrológica, incluida la simulación de IV en diferentes condiciones meteorológicas, puede respaldar la formulación de políticas para el desarrollo de infraestructura (Chen *et al.* 2021). Dentro de estas acciones, también se contemplan aquellas no estructuradas de gestión, políticas y educación que mejoran el uso y conservación de los servicios ecosistémicos en las áreas urbanas (Unión Europea 2014). El ser humano tiende a generar riesgos de los que no quiere responsabilizarse, al no aplicar la normativa existente para prevenir desastres (Fernández Arce *et al.* 2018). Con respecto a esto, el propósito de la modelización es para simular procesos con el fin de entender un sistema, para proyectar un comportamiento futuro y para la toma de decisiones (Birkel y Barahona 2019).

En Costa Rica, el concepto de infraestructura verde (IV) llega a ser consolidado mediante el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), el Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE) y el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH), para la incorporación de medidas de resiliencia en la infraestructura pública; llega a definirse por ley bajo el Decreto Ejecutivo N.º 42465 MOPT-MINAE-MIVAH como:

Una red interconectada de cobertura verde o espacios azules que conservan las funciones y valores de los ecosistemas naturales y provee beneficios asociados a la población humana, como servicios esenciales para actividades productivas, regulación de la temperatura, conservación del recurso hídrico, rehabilitación

de suelos, recuperación de paisajes, y, complementa o reemplaza obras de infraestructura gris” (MOPT-MINAE-MVAH 2020).

Por otro lado, el autor Magdaleno (2017) define que las infraestructuras grises son aquellas de transporte (carreteras, vías férreas, terminales de puertos o aeropuertos, canales), de distribución de servicios (redes de saneamiento, redes de agua y gas, instalaciones de generación y transporte de energía, instalaciones de residuos sólidos), sociales (escuelas, hospitales, instalaciones deportivas, defensas costeras y fluviales, instalaciones gubernamentales) o comerciales (fábricas, oficinas, tejido minorista, minas, canteras). Para Foster *et al.* (2011), en relación con el recurso hídrico, indican que las infraestructuras grises comprenden aquellas estructuras convencionales de almacenamiento (embalses, balsas) y conducción (tuberías, canales) utilizadas para la gestión de aguas de abastecimiento, aguas residuales o pluviales, por lo general, estas han sido construidas a base de hormigón o metal.

Existen pocos estudios sobre los efectos hidrológicos ocasionados por procesos de urbanización y que se manifiestan debido a la disminución de la cobertura arbórea; el aumento de las superficies impermeables disminuye la calidad y aumenta la cantidad de agua sobre los ríos por la disminución del área de infiltración en la GAM de Costa Rica. Sumado a esto, la presión humana, la importancia económica e industrial, el crecimiento urbano, la planificación y gestión del territorio, entre otros, son elementos que permiten generar interés de realizar estudios e intervenciones orientados a hacer frente a dichos efectos hidrológicos en la microcuenca.

Como todo proceso de gestión en las cuencas hidrográficas, la gestión de las aguas urbanas debe ser un proceso participativo, interactivo y flexible que integre elementos fundamentales involucrados en el ciclo de las aguas urbanas para maximizar los múltiples beneficios de manera equitativa (Banco Mundial s. f.). En relación con esto, la FAO (2018) señala que existe una tendencia muy marcada que llegará a reconocer a los actores de la sociedad civil como entes trascendentales para el análisis de políticas que promuevan los beneficios de la silvicultura urbana.

Por su parte, el servicio ecosistémico de regulación hídrica es aquella proporción de precipitaciones que pueden ser interceptadas por vegetación e infiltradas para almacenarse en el subsuelo, contribuyendo al constante flujo de agua como escorrentía superficial (Jullian *et al.* 2018). En tal sentido, para determinar los efectos de las SbN sobre el servicio ecosistémico hídrico y la viabilidad de la implementación en la microcuenca, se ha abordado con la implementación de IV para el manejo eficiente de las aguas pluviales, tomando en cuenta la percepción social de los actores claves del Corredor Biológico Interurbano Río Torres Reserva de la Biosfera (CBIRTRB). Este fue creado por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) en el 2017 mediante el Decreto Ejecutivo 40043-MINAE, donde se nombró un comité directivo llamado Comité Local (CL) conformado por entes públicos, privados y representantes de la Sociedad Civil, con el objetivo de favorecer la recuperación ecológica, propiciando así la conservación de la biodiversidad y el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades vecinas con una articulación de esfuerzos que pretenden construir gradualmente un proceso de ordenamiento en la cuenca urbana, sin comprometer los ecosistemas que ya se han dañado (Feoli 2013).

Sobre el CBIRTRB, se han generado iniciativas e información mediante el apoyo reciente de proyectos como Biodiver_City, que ha generado información clave para la toma de decisiones en el marco de la creación de entornos urbanos sostenibles. Dentro de este, se da el origen de la definición de “Ciudad Verde” que busca orientar hacia un futuro con

reconocimiento fundamental de los servicios ecosistémicos para el mejoramiento de la calidad vida de los ciudadanos urbanos. Este concepto se define de la siguiente manera:

Una ciudad verde es aquella ciudad accesible e inclusiva que se gestiona con participación de sus habitantes donde abundan los espacios naturales y la biodiversidad, que impactan de manera directa en su capacidad de resiliencia. Su fin último es maximizar el bienestar humano, resultando en bajos niveles de contaminación, mejora en la apropiación del espacio urbano, propicia interacciones positivas para la recreación, salud física y mental, con un enfoque ecosistémico (Corrales Chaves 2020).

Para cuantificar el efecto de SbN en el servicio ecosistémico hídrico mediante las IV, se utilizó el modelo i-Tree Hydro Plus. Esta es una herramienta que ha demostrado ser lo suficientemente adecuada y eficiente para proporcionar una evidencia justificable del impacto hidrológico que se tiene por los cambios en la cubierta terrestre (i-Tree 2020). En tal sentido, se tiene un enfoque de servicio ecosistémico de regulación climática para el control y prevención de inundaciones (Avendaño-Leadem *et al.* 2020).

Por lo tanto, se ha planteado desarrollar los objetivos siguientes: identificar los parámetros adecuados para realizar un balance hídrico que considere la infraestructura verde y gris, con el fin de cuantificar los beneficios que obtienen del servicio ecosistémico hídrico en escenarios con implementación de SbN. A su vez, identificar y facilitar por medio de esta investigación la viabilidad de la implementación de SbN, involucrando a los actores locales de la microcuenca del río Torres.

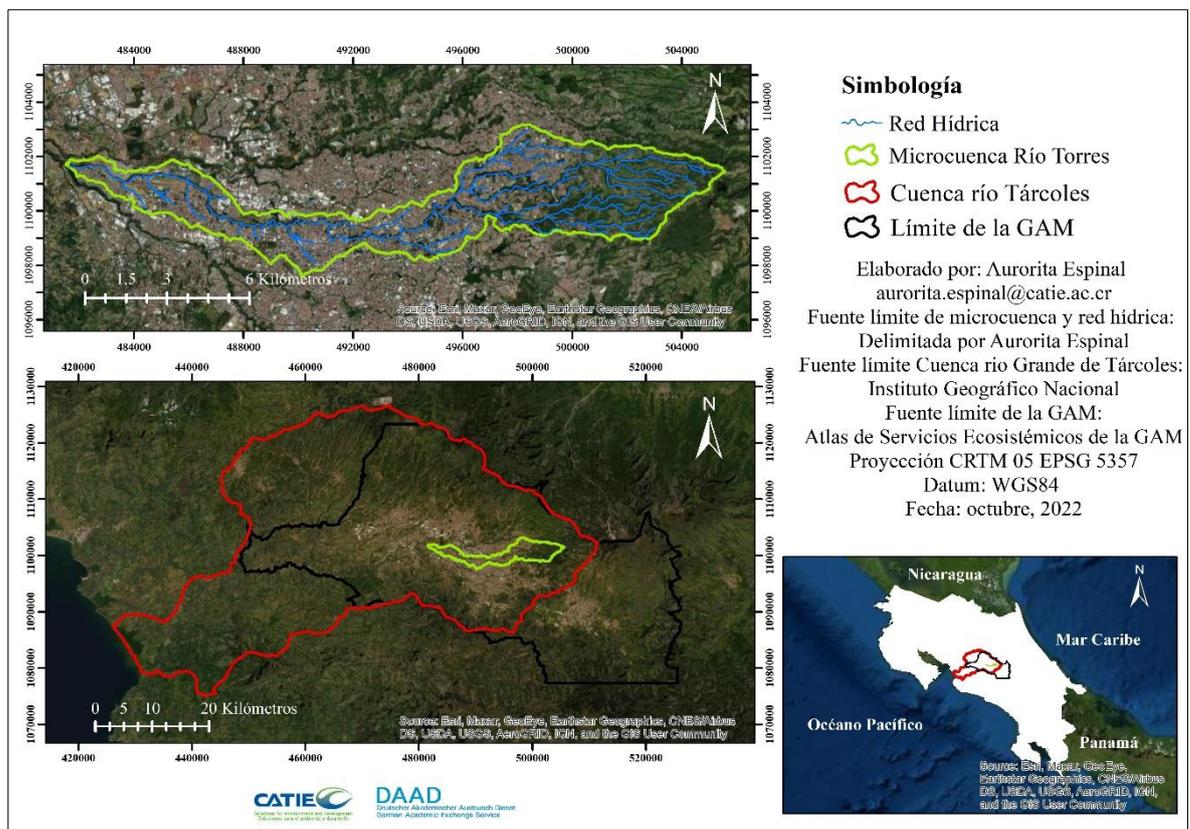
2. METODOLOGÍA

a. Ubicación y descripción del área de estudio

La microcuenca río Torres está situada en el sector central de la Gran Área Metropolitana al norte de la provincia de San José, localizada dentro de los límites de la subcuenca de río Virilla; pertenece a la cuenca del río Grande de Tárcoles, en la vertiente del Pacífico de Costa Rica. La GAM es denominada como Ciudad Capital, principalmente, por ser una zona de aglomeración urbana. Está ubicada en el Valle Central del país, tiene un área de 1.779 km², comprende cuatro ciudades históricas (San José, Heredia, Alajuela y Cartago) y sus periferias (Quesada-Román *et al.* 2020). Por su parte, el río Torres es uno de los tributarios que presenta una fuerte presión poblacional dentro de la GAM, en consecuencia, es un afluente que transporta considerable cantidad de contaminantes. La microcuenca del río Torres tiene un área de 50,24 km² que equivale al 2,82% de la superficie de la GAM.

La microcuenca se encuentra entre las coordenadas geográficas 9°57'42.71" latitud norte y 84°2'34.67" longitud oeste, ubicada entre el gradiente altitudinal de 910 a 2040 m s.n.m.; su cauce principal es de cuarto orden, fue determinado por medio del *software* SAGA Gis 7.8.2, con una longitud de 31,7 km. Nace en Rancho Redondo, Goicoechea y desemboca sus aguas en el distrito La Carpio, en San José (Fallas Cordero 2015) citado por (Alvarado - García *et al.* 2020), finaliza en la Planta Hidroeléctrica Electriona en Pavas y en la Planta Hidroeléctrica Belén (Castillo y Sáez Peña 2020; Trujillo-Acosta *et al.* 2016).

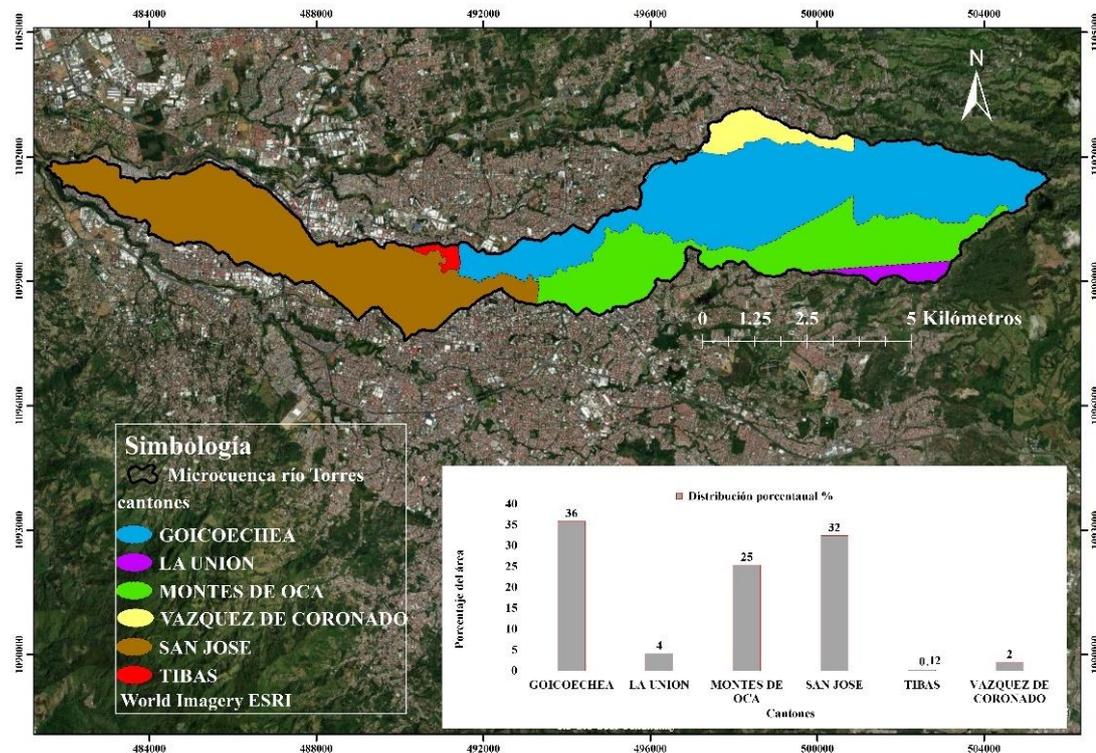
Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio, microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.



b. Geografía

Por su ubicación geográfica, la microcuenca río Torres abarca seis cantones de la provincia de San José y Cartago, siendo integrada en mayor área por el cantón de Goicoechea con un 35.80%, el cantón de San José con un 32.38% y el cantón Montes de Oca con un 25.36% del área de la microcuenca.

Figura 3. Distribución cantonal en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.



c. Variables biofísicas

La microcuenca tiene suelos del orden Andisoles (Alvarado-García *et al.* 2020), estos derivados de cenizas volcánicas (Chinchilla *et al.* 2011). La precipitación anual varía entre los 2.000 a 3.000 mm, la temperatura promedio es de 20 °C, con una humedad relativa media anual de 70% (Alvarado-García y Zúñiga-Amador 2018). La temperatura superficial es de 39,6°C y con un índice biótico del suelo (IBS) de 47 para la mitigación de escorrentía superficial (MINAE - GIZ 2020). Este valor indica la relación que existe entre las superficies funcionalmente significativas (suelos permeables, suelos semipermeables y suelos impermeables) y el ciclo natural del suelo en relación con el área total (Rueda 2010).

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, se encontró que la microcuenca está ubicada entre tres zonas de vida: Bosque Húmedo Premontano en la parte baja y media (46,3%), Bosque muy Húmedo Premontano en la parte media alta (30,4%) y Bosque muy Húmedo Premontano Bajo en la parte alta (23,3%) (Holdridge 1982). Esto da como resultado una variedad en temperatura y precipitación que favorece la presencia de biodiversidad en la microcuenca (Valle-Hidalgo 2021).

d. Actividades socioproductivas

Las actividades productivas en la GAM presentan patrones de concentración muy marcados; existe una confluencia de funciones urbanas de gestión en el cantón de San José (Pujol Mesalles *et al.* 2011) con grandes parques industriales que demandan de mucho espacio físico para sus operaciones; también existe un crecimiento en la construcción de residencias y de infraestructura comercial (Arias Ramírez y Sánchez Hernández 2012), así como sector servicio de escuelas, universidades, hospitales y las sedes centrales de las instituciones del Estado (Potthast y Geppert 2019). No obstante, la GAM sostiene a más del 50% de la población nacional, un 80% de las actividades industriales y más del 50% de las actividades agropecuarias (Rodríguez Castillo y Sáez Peña 2020).

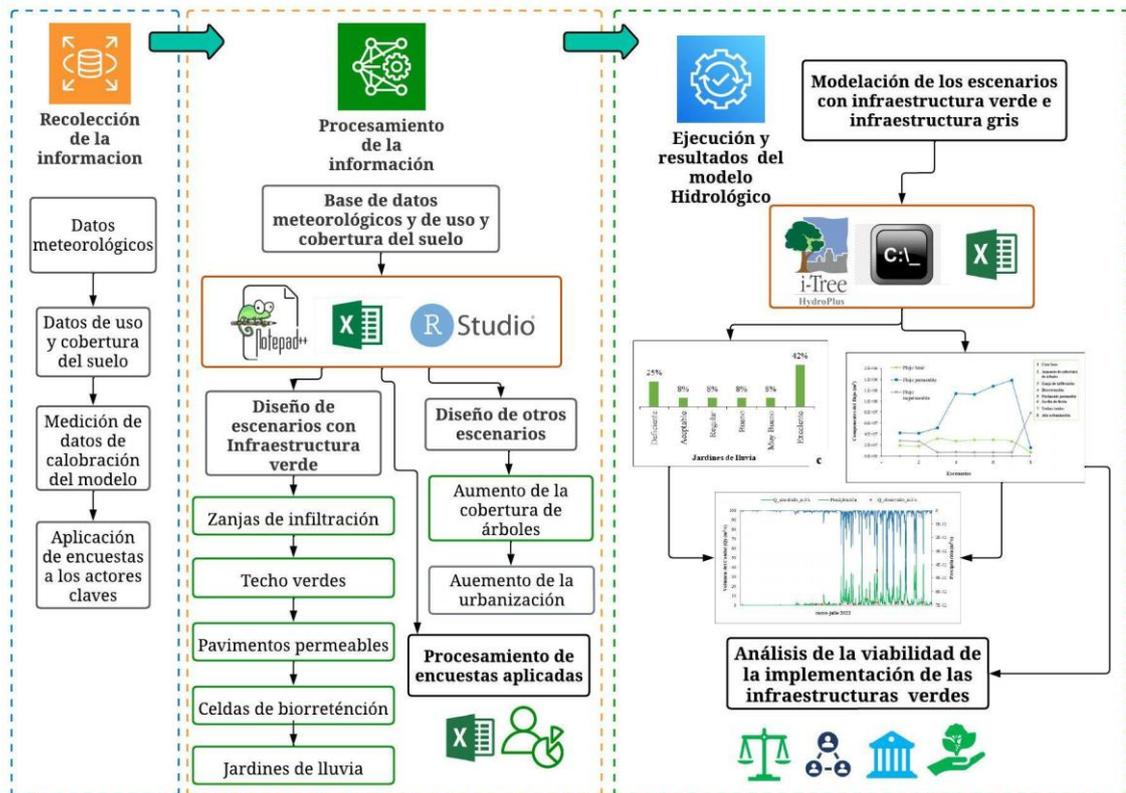
e. Proyecciones de población

En Costa Rica, el 51,3% de la población total del país se encuentra establecida en la GAM (Sánchez Hernández 2018), por lo tanto, se entiende que la microcuenca río Torres alberga gran cantidad de esta población y está influenciada directamente por ella. El comportamiento poblacional de la GAM, visto desde la perspectiva de las tasas de crecimiento anuales de la población, muestra un crecimiento superior al agregado de todo el país (Pujol Mesalles *et al.* 2011). Esto indica que la microcuenca río Torres es una región con alta densidad poblacional y su proyección tiende a aumentar por las actividades socioeconómicas que se concentran en la GAM. A excepción del cantón de Tibás, en todos los cantones, la población humana ha aumentado desde el 2000, para un total de 410.000 habitantes localizados en los cantones del CBIRTRB. El 50% de estos se concentra en el cantón de San José y el menos densamente poblado es el cantón de Goicoechea (CBIRTRB 2020).

f. Procedimiento metodológico

El esquema que se muestra, a continuación, describe las fases del proceso realizado en esta investigación (figura 4).

Figura 4. Proceso metodológico de la investigación

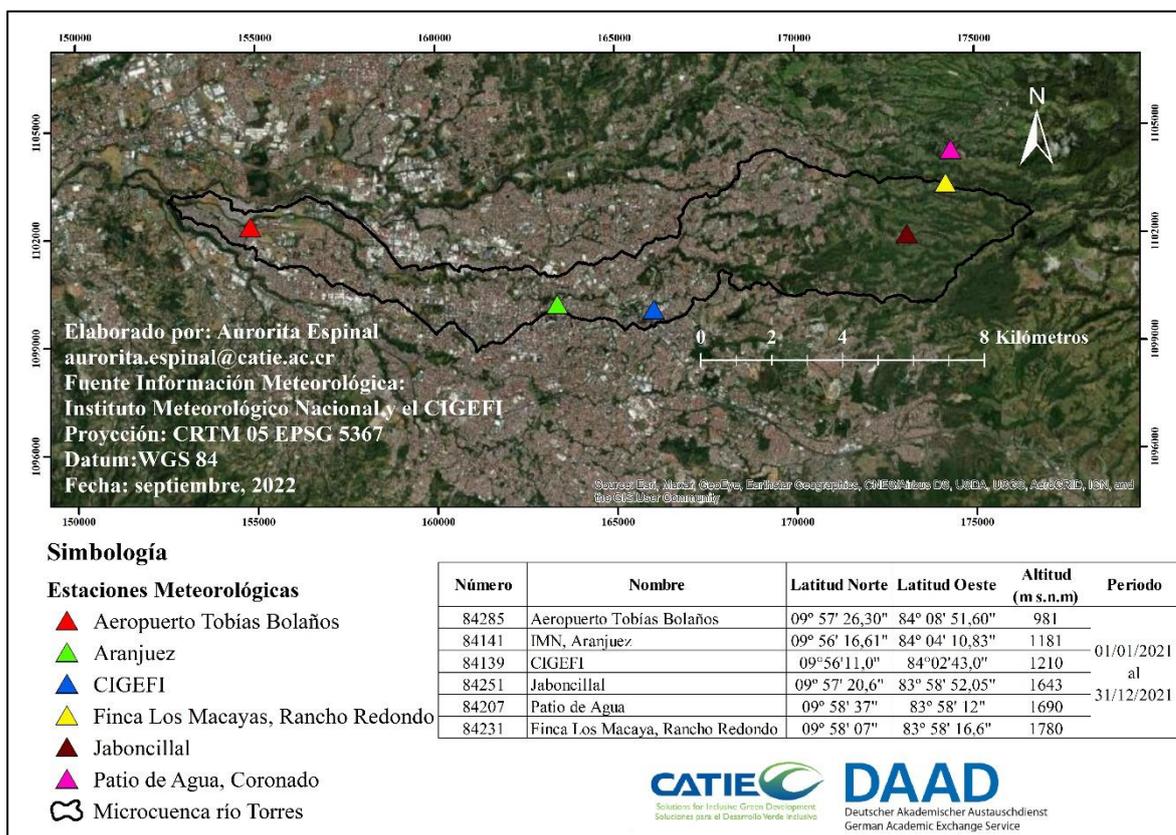


2.1 Evaluación del efecto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el servicio ecosistémico hídrico mediante la modelación hidrológica con iTree-Hydro Plus.

2.1.1 Identificación y obtención de los parámetros requeridos para la modelación hidrológica.

La información meteorológica necesaria para realizar la modelación hidrológica fue solicitada al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) y al Centro de Investigación Geofísicas (CIGEFI); estos son datos horarios por día para el 2021 provenientes de seis estaciones meteorológicas (figura 5) circundantes a la zona de estudio, como uno de los insumos requeridos para la modelación hidrológica. Se hizo uso del programa RStudio para el procesamiento de los datos meteorológicos.

Figura 5. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.



Para estimar mejor la respuesta hidrológica, se elaboró una base de datos meteorológicos mediante promedios, con el fin de obtener más y mejor representatividad de las condiciones meteorológicas de parte alta, media y baja de la microcuenca. Además, la información de la ocupación del suelo actual de la microcuenca originalmente está definida bajo el sistema de clasificación Corin Land Cover para Costa Rica (Leyenda CLC-CR), desarrollado por el Sistema de Monitoreo de la Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE) (CENIGA 2018).

En función de esto, instituciones costarricenses como el Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), con el apoyo financiero de la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ), han generado la información del uso del suelo bajo el enfoque de infraestructura verde en el marco del Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana (MINAE-SINAC-GIZ-CATIE 2020). Dicha información de cobertura de suelo fue utilizada como insumo esencial en esta investigación. Además, la información del suelo, el límite de la microcuenca, el Modelo de Elevación Digital (DEM) y la red hídrica se encuentra en la proyección CRTM05.

La delimitación de los límites de la microcuenca se realizó con el programa Quantum GIS (Sistema de Información Geográfica, por sus siglas en inglés); este es un *software* de acceso libre, además, fue útil para la clasificación de las coberturas del suelo. Paralelamente, también fue necesario contar con otra información de entrada necesaria que se describe a continuación:

Cuadro 1. Insumos utilizados para la investigación.

	Insumos	Fuente	Formato	
Morfometría	Límite de la microcuenca	Delimitación propia	Shape (.shp)	
Relieve	Modelo de Elevación Digital (DEM)	Proyecto Biodiver_City	Tag Image File Format (.tif)	
	Red Hídrica	Elaboración propia a partir del DEM	Shape (.shp)	
Red de Drenaje	Cauce principal	Elaboración propia a partir del DEM	Shape (.shp)	
	Órdenes del río	Elaboración propia a partir del DEM	Shape (.shp)	
Suelo	Uso del suelo	Atlas de Servicios Ecosistémicos de la GAM	Shape (.shp)	
	Índice de área foliar de árboles (resolución espacial 30x30 m)	NOAA ³	--	
	Índice de área foliar de arbusto (resolución espacial 30x30 m)	NOAA	--	
	Índice de área foliar de herbáceas (resolución espacial 30x30 m)	NOAA	--	
	Área Impermeable Directamente Conectada (DCIA)	(i-Tree 2019)	--	
		Parámetro	Fuente	Unidades
		Precipitación	IMN/CIGEFI	mm/h
Clima	Radiación solar	Servidor de la NASA ⁴	W/m ² /h	
	Temperatura máxima	IMN	°F/h	
	Temperatura mínima	IMN	°F/h	
	Temperatura media	IMN	°F/h	
	Humedad relativa	IMN/CIGEFI	%	
	Presión atmosférica	IMN	Mbar/h	
	Velocidad del viento	IMN	m/h	
	Dirección del viento	IMN	N/A	
	*Temperatura del punto de rocío	IMN	°F/h	
	**Evaporación	IMN	mm/h	

³ Agencia científica que se encarga del monitoreo de los océanos y la atmósfera. Datos para Costa Rica obtenidos de <http://ftp.ncei.noaa.gov/>

⁴ Plataforma de acceso libre con información de datos solares y meteorológicos. Datos para Costa Rica obtenidos de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

* La temperatura del punto de rocío fue calculada utilizando la temperatura promedio y la humedad relativa con la fórmula propuesta en 2005 por Mark G. Lawrence (Lawrence 2005).

$$T_d = T - \left(\frac{100 - RH}{5} \right)$$

Donde:

T_d= Temperatura del punto de rocío

T= Temperatura en grados Celsius

RH= Humedad relativa en porcentaje

** Para obtener la variable evaporación, primero, se calculó la evapotranspiración con la información de las variables de radiación solar, temperatura y humedad relativa por el método de Penman Monteith. Posteriormente, para extraer la evaporación, se ajustó por el método de Evaporación en bandeja de FAO, asumiendo un coeficiente promedio (k_p) con vientos moderados y condiciones húmedas (>70%) que equivale a 0.8 (FAO 1998).

$$ET_0 = K_p * E_{Pan}$$

Sustituyendo la fórmula para obtener la Evaporación queda de la siguiente manera:

$$E_{Pan} = ET_0 / K_p$$

Donde:

ET₀ = Evapotranspiración

K_p = Coeficiente de la bandeja

E_{Pan} = Evaporación de la bandeja

2.1.2 Relación de usos y cobertura del suelo con los parámetros requeridas por i-Tree Hydro Plus.

La cobertura del suelo es aquella que, en un determinado lugar, contiene elementos bióticos y abióticos; el uso del suelo hace referencia al uso funcional con actividades realizadas de carácter biofísico o cultural hechas sobre la cobertura del suelo en un determinado lugar (CENIGA 2020). Por su parte, la información de la cobertura del suelo fue obtenida del Atlas de Servicios Ecosistémicos para la GAM de Costa Rica; esta es una herramienta de información geoespacial creada bajo el marco del proyecto Biodiver_City. Este Atlas es único en el país y sirve para la toma de decisiones de múltiples sectores (MINAE-SINAC-GIZ-CATIE 2020). La información obtenida fue a los límites del CBIRTRB a nivel de infraestructuras verdes, esto permitió relacionarlas con los tipos de uso del suelo que requiere i-Tree Hydro Plus. Además, el área de uso restante a los límites de la microcuenca fue obtenida por el mapa de usos del suelo de la GAM del 2020; estas coberturas fueron clasificadas según se detalla en el cuadro 2.

Cuadro 2. Tipos de usos y cobertura del suelo y clasificación de parámetros para i-Tree Hydro Plus.

N.º	Tipos de cobertura y uso del suelo	Área (km ²)	Parámetros para i-Tree Hydro Plus
1	Árboles a lo largo de autopistas	0,02	Cobertura de árboles con dosel sobre suelo impermeable
2	Árboles a lo largo de vías férreas	0,01	
3	Árboles dispersos	0,64	
4	Bosque secundario	0,27	Cobertura de árboles con dosel sobre suelo permeable
5	Bosque y arbolado en las riberas de ríos	6,98	
6	Bosques y arbolados periurbanos	7,64	
7	Cafetales arbolados	0,21	
8	Campos deportivos y recreativos	0,18	Vegetación corta
9	Cercas vivas	0,02	
10	Parques y pequeños jardines con árboles (< 0.5 ha)	1,99	
11	Terrenos baldíos (arbustos)	0,84	
12	Terrenos baldíos (con predominancia de herbáceas/pastizales)	4,24	
13	Pastos cultivados	3,83	Cobertura de agua
14	Cuerpos de agua	0,05	
15	Cultivos anuales	0,11	Cobertura de suelo
16	Superficie no pavimentada	2,91	
17	Superficie pavimentada	8,08	Cobertura impermeable
18	Techos/Edificios	12,22	
Total		50,24	

A continuación, se muestra la relación de los tipos de cobertura de suelo basado en los requerimientos de entrada del modelo i-Tree Hydro Plus con áreas y porcentajes de cada una de ellas (i-Tree 2019).

Cuadro 3. Clasificación de usos del suelo según los parámetros requeridos por i-Tree Hydro Plus.

Cobertura del suelo para i-Tree Hydro Plus	Área (km ²)	Área (%)	Fuente
Cobertura de árboles con dosel sobre suelo permeable	15,09	30,04	Atlas de Servicios Ecosistémicos de la GAM
Cobertura de árboles con dosel sobre suelo impermeable	0,67	1,33	
Vegetación corta	11,11	22,11	
Cobertura de agua	3,02	6,01	
Cobertura de suelo	0,05	0,09	
Cobertura impermeable	20,31	40,42	
Total	50,24	100,00	

2.1.3 Descripción del modelo i-Tree Hydro Plus

El modelo i-Tree Hydro Plus, versión actualizada al 2022, es un modelo de investigación y manejo forestal basado en procesos, que analiza explícitamente los efectos de la vegetación y los suelos en el ciclo hidrológico urbano (Wang *et al.* 2008). Utiliza el modelo de hidrología *StatisticalHydro* que opera bajo un marco semidistribuido o conocido también como distribución estadística (i-Tree 2022), basado en procesos físicos de lluvia-escorrentía que combina conceptos de hidrología urbana y forestal (Yang *et al.* 2011). Se apoya en la topografía que combina de manera única un conjunto de algoritmos de interceptación, almacenamiento, infiltración, evaporación y escorrentía, que permite representar los comportamientos de las superficie permeables e impermeables (Wang *et al.* 2008).

Esta versión de modelo incluye funciones para modelar infraestructuras verdes basadas en los fundamentos de la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) del Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM por sus siglas en inglés) y con la colaboración del trabajo de Abdi (2019) sobre el desarrollo de algoritmos informáticos para simular la restauración basada en la naturaleza de sistemas fluviales y pluviales urbanos. Los autores Chen *et al.* (2021) suponen que este modelo SWMM está configurado para simular de manera fiable las características de la lluvia y la escorrentía con escenarios provistos de IV. Por otro lado, el modelo i-Tree Hydro Plus ha sido evolucionado de versiones anteriores que han demostrado ser una herramienta eficaz para simular la reproducción de volúmenes de escorrentías, ya que, en el proceso de calibración, se desarrolla mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe para evaluar su capacidad predictiva (Wang *et al.* 2005).

2.1.4 Combinación de herramientas computacionales para el uso de i-Tree Hydro Plus

A la fecha, para la ejecución del modelo i-Tree Hydro Plus, no existe una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que permita manipular de manera interactiva la herramienta, en vista de que actualmente se encuentra en desarrollo. Es necesario utilizar diferentes herramientas que operan en un marco de programación informática escrita en lenguaje C++ (Abdi 2019). En primera instancia, se utilizó el *software* Visual Studio Versión del SDK 10.0 de Windows y el conjunto de herramientas de la plataforma de Visual Studio 2022 (v143) para ver, editar y compilar el código fuente C++ (i-Tree 2022). Los modeladores hidrológicos aplican el código C++ al estudio de los procesos de las cuencas hidrográficas, ya que permiten manejar muchos tipos de datos diferentes para simular las respuestas del suelo en procesos de lluvia-escorrentía (Wang *et al.* 2005). La compilación se realizó mediante el archivo *HydroPlus.sln* con el fin de reconstruir la solución para compilar una copia nueva de *HydroPlus.exe* que aparece creada en el mismo directorio de la solución después de la compilación.

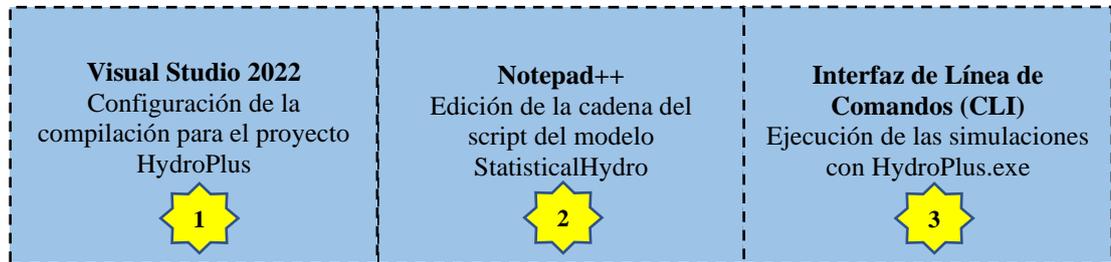
Seguidamente, se procedió a actualizar los archivos de *configuración.xml* con las últimas funciones basadas en estadísticas hídricas. Este ajuste se realizó ejecutando los archivos de configuración por lotes con el *software* editor Notepad++. Se configuraron los comentarios en la cadena del *script* del archivo de configuración para el presente proyecto de i-Tree Hydro Plus incorporando las funciones de *StatisticalHydro* para la modelación hidrológica⁵.

Al realizar todo el proceso anterior y al reunir los archivos de entrada, incluyendo el archivo de *configuración.xml*, se ejecuta el archivo *HydroPlus.exe* desde la Interfaz de Línea de

⁵ Este procedimiento se encuentra detallado paso a paso en el Manual Técnico de i-Tree Hydro Plus versión actualizada de marzo, 2022. Disponible en https://www.itreetools.org/documents/514/HydroPlus_TechnicalManual.pdf

Comandos (CLI) (Abdi 2019) del sistema operativo del ordenador. El modelo se ejecuta según las configuraciones y parámetros que se determinaron en los archivos de entrada.

Figura 6. Herramientas computacionales utilizadas en el proceso de la modelación hidrológica.

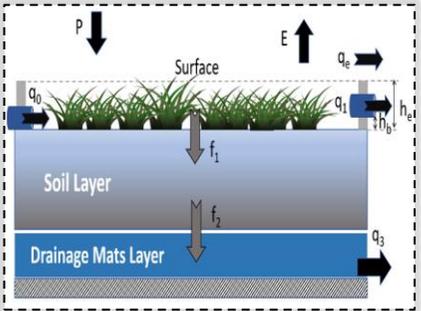
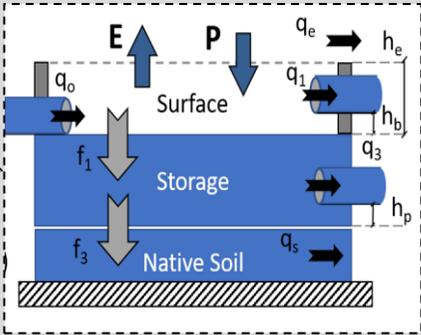


2.1.5 Estructuras de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)

Las SbN consideradas en este estudio de investigación entran dentro del tipo 3 y se caracterizan como el manejo de ecosistemas de maneras extensas o inclusive la creación de nuevos ecosistemas vinculados con soluciones como techos verdes, infraestructuras verdes y azules para la restauración de áreas degradadas o contaminadas, en general, esto con el fin de crear ciudades más verdes (Eggermont *et al.* 2015). En esta oportunidad, las IV están siendo consideradas para el manejo de aguas pluviales en los entornos urbanos (i-Tree 2019).

Según se especifica en el cuadro 4, estas representaciones de las estructuras fueron diseñadas por los desarrolladores del modelo i-Tree Hydro Plus procedentes de la Facultad de Ciencias Ambientales y Forestales de la Universidad de Syracuse, Nueva York (SUNY-ESF), sobre la modelización de IV (Abdi 2019, i-Tree 2022). Los esquemas representan el movimiento del agua a través de la estructura de la IV; sin embargo, el movimiento estudiado por i-Tree Hydro Plus se da a través del suelo por medio de tres capas representadas por el modelo, estas son: la zona de la raíz, la zona no saturada y la zona saturada (Abdi 2019).

Cuadro 4. Infraestructuras verdes consideradas en la modelación hidrológica y diseño esquemático de la representación de los movimientos del agua a través de la estructura.

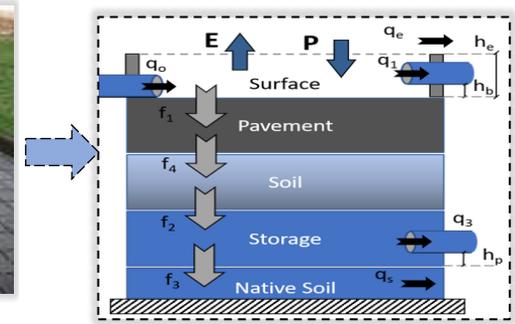
Infraestructura verde	Definición	Figura del diseño ⁶	Esquema de la estructura de IV ⁷
Techos verdes	Son aquellos tejados de viviendas, edificios industriales o de oficinas que se cubren con medios de vegetación que permiten la infiltración de la lluvia y la evapotranspiración del agua almacenada. Son especialmente rentables en las zonas urbanas densas, donde el valor del suelo y los costos de gestión de las aguas pluviales son elevados (EPA s.f.).		
Zanjas de infiltración	Una zanja de infiltración suele consistir en una zanja llena de grava que permite que las aguas pluviales se absorban en el suelo; adecuadas para el entorno urbano, especialmente cuando se combinan con otros controles de aguas pluviales (EPA 2012).		

⁶ Fuente de la figura del diseño de la infraestructura verde ha sido obtenida por la fuente de la definición de la EPA.

⁷ Fuente del esquema de la estructura de la infraestructura verde fue tomada del Manual Técnico de i-Tree Hydro Plus actualizado de marzo del 2022.

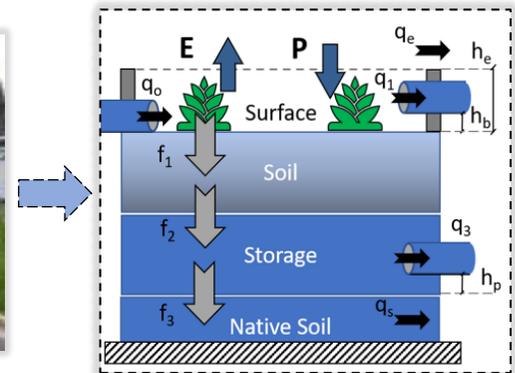
Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables infiltran, tratan o almacenan el agua de lluvia donde cae. Estos pueden ser de hormigón permeable, asfalto poroso o adoquines permeables, es especialmente rentable cuando el valor del suelo es alto y las inundaciones son un problema (EPA s.f.).



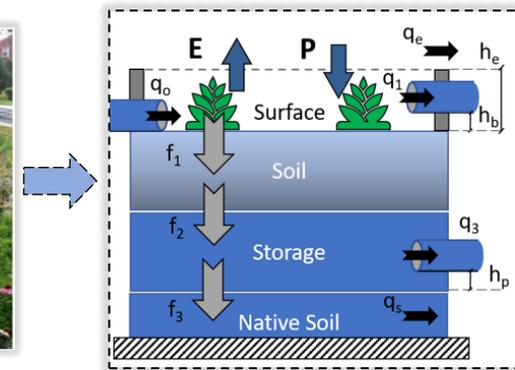
Jardines de lluvia

Son áreas pequeñas, poco profundas con una pequeña depresión con plantas. Recogen la escorrentía de las aguas pluviales de los tejados, las calles y las aceras, están diseñadas para imitar la forma natural en que el agua fluye y se absorbe en la tierra (EPA s. f.).



Celdas de biorretención

Estas prácticas ejercen un funcionamiento similar a los jardines de lluvia, son depresiones ajardinadas que tratan las aguas pluviales *in situ*; es decir, las aguas procedentes de superficies impermeables, tejados, carreteras, aceras, estacionamientos y césped compactado. Se utilizan para recoger las aguas pluviales y filtrarlas a través de una mezcla de tierra, arena o grava (EPA 2021).



Donde en los esquemas de las estructuras:

P significa la precipitación

E significa la evaporación

q representa el flujo de agua del diseño de la IV con los sustratos de

q_0 para la entrada

q_1 para la salida superficial

q_3 para el subdrenaje

q_e para la salida del vertedero de emergencia

q_s para el flujo de base

f representa el movimiento del agua en la dirección vertical con los sustratos:

f_1 para la infiltración

f_2 para la percolación

f_3 para la exfiltración

f_4 para la percolación a través del pavimento

h_b es la altura de la tubería de salida desde la superficie

h_e es la altura de salida del aliviadero de emergencia

h_p es la altura de desplazamiento del desagüe

2.1.6 Diseño de escenarios de cobertura del suelo para la modelación

El diseño se realiza mediante un archivo de *configuración.xml* que gestiona las entradas de los parámetros y las salidas relacionadas (Abdi 2019); este contiene la cadena del *script* que funciona como una “llave maestra”, la cual determina las configuraciones y parámetros para la ejecución del modelo *StatisticalHydro* (i-Tree 2022). Para el caso base, la configuración del *script* cuenta con una cadena de parámetros compuesta por una carpeta de datos que representa la estructura hidrológica del proyecto y para los escenarios alternativos, la estructura hidrológica del proyecto base contiene una nueva carpeta de datos que se combinan y se comparan hidrológicamente con las configuraciones y parámetros de los casos alternativos.

2.1.6.1 Escenario base

El planteamiento del caso base consiste en determinar la magnitud de generación de escorrentías modelando hidrológicamente las condiciones actuales de uso del suelo en la microcuenca. Estos usos del suelo incluyen superficies con árboles, arbustos y herbáceas; superficies impermeables, superficies de agua y de suelo permeable, como punto de referencia para modelar los escenarios futuros.

Cuadro 5. Parámetros de uso y cobertura del suelo del caso base

Parámetros de cobertura	Área caso base (km ²)	%
Cobertura de árboles sobre suelo permeable	15,09	30,04
Cobertura de árboles sobre suelo impermeable	0,67	1,33
Vegetación corta	11,11	22,11
Cobertura de suelo	3,02	6,01
Cobertura de agua	0,05	0,09
Cobertura impermeable	20,31	40,42
Total	50,24	100,00

El balance hídrico general actual de la microcuenca está integrado por los flujos explícitos para i-Tree Hydro Plus en el ciclo del agua: la precipitación, evaporación de la superficie de vegetación, infiltración, escorrentía, caudal y flujo base (Wang *et al.* 2008).

$$\text{Balance hídrico general} = P - Ev - I - Q - Fb$$

Donde:

P= Precipitación

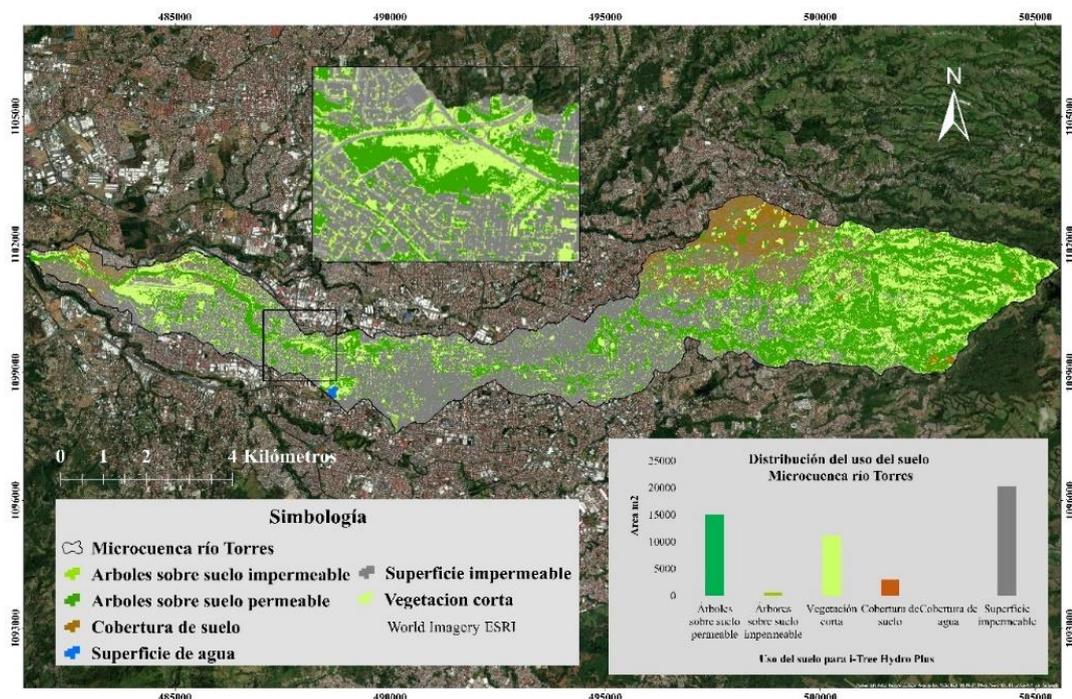
Ev= Evaporación

I= Infiltración

Q= Caudal

Fb= Flujo base

Figura 7. Uso del suelo para la modelación del caso base de la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.



2.1.6.2 Escenarios futuros basados en cambios de cobertura del suelo

La parametrización de los escenarios alternativos con IV se realizó mediante el archivo de configuración especificado para cada tipo de IV. Este contiene la información del caso base y una nueva carpeta de datos para incorporar la información de la infraestructura verde dentro de la cadena del *script*; lo cual permitió hacer comparaciones hidrológicas con respecto al caso base.

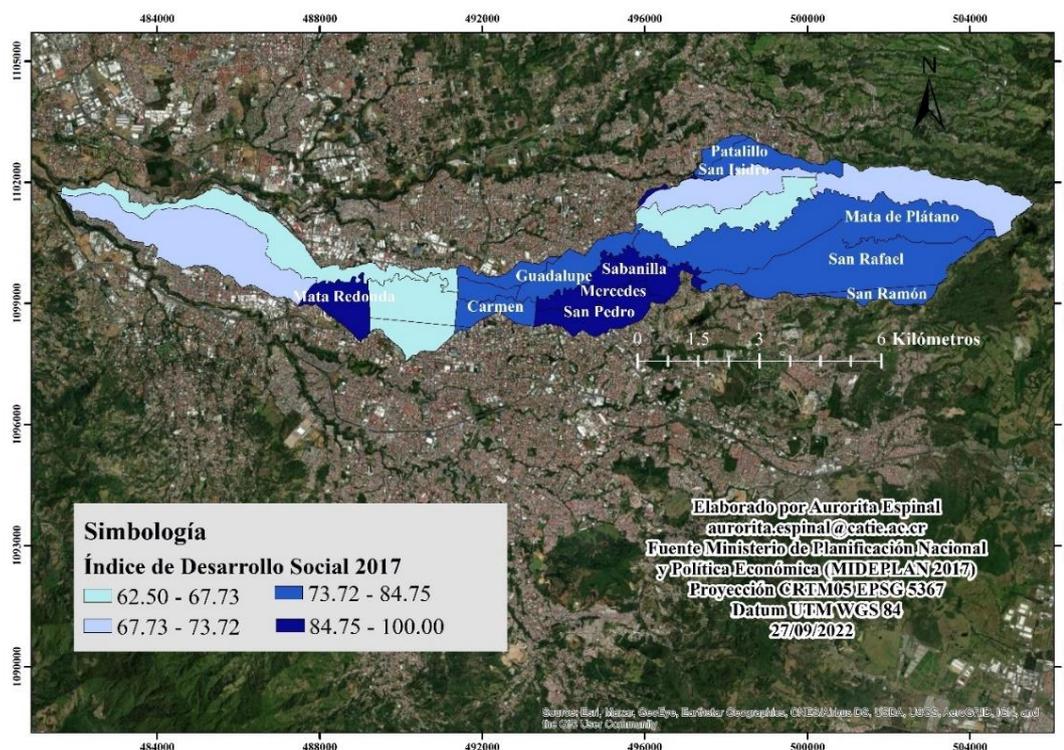
Los escenarios futuros se diseñaron optando por sitios con mejores posibilidades de implementación e identificados por su nivel del Índice de Desarrollo Social (IDS), según lo establecido por el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). Se dividieron los índices en rangos iguales tomando 2 cuartiles de rango mayor (con valores más cercanos a 100) que se encuentra de >73,72% a 100,00% (ver figura 8), en los que se abarcan 11 distritos dentro de la microcuenca: Mata Redonda, Carmen, Guadalupe, Mercedes, San Pedro, Sabanilla, Platanillo, San Isidro, Mata de Plátano, San Rafael y San Ramón (MIDEPLAN 2017). Este rango ha sido considerado, ya que, cuanto más cercano a 100, denota en promedio las posiciones más favorables en cuanto a la dimensión económica, de participación social, salud, educación y seguridad (MIDEPLAN 2018).

Para el análisis del potencial de generación de escorrentías de la microcuenca, se generó un balance hídrico de escorrentías, compuesto por los componentes de flujo de agua sobre los usos del suelo, lo cual da como resultado un balance hídrico que involucra el flujo permeable, flujo impermeable y flujo base.

$$\text{Balance hídrico de escorrentías mm} = Ft - Fi - Fp - Fb$$

Donde:
 F_t = Flujo total
 F_i = Flujo impermeable
 F_p = Flujo permeable
 F_b = Flujo base

Figura 8. Clasificación de distritos por categoría de IDS en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.



Se diseñaron siete escenarios futuros en relación con el caso base, cada uno fue modelado por separado sobre un área de 40% con cambios en la cobertura del suelo, para determinar su contribución individual. Cinco escenarios corresponden a la implementación de IV para tratar un 40% de las aguas pluviales; un escenario está compuesto por un aumento del 40% de cobertura de árboles con dosel sobre suelo permeable y, por último, un escenario con un aumento del 40% de crecimiento descontrolado de urbanización. El diseño por cada uno de los escenarios modelados se muestra de la figura 9 a la 13.

Cuadro 6. Descripción de los escenarios de IV, cobertura de árboles y alta urbanización

Escenario	Planteamiento	Descripción
1,2,3,4,5	Implementación de: <ul style="list-style-type: none"> - Celdas de biorretención - Jardín de lluvia - Zanjias de infiltración - Techos verdes - Pavimentos permeables 	Se analizó la dinámica hidrológica con la implementación de IV para tratar aguas pluviales provenientes de un área de 20,09 km ² que corresponde a un 40%, con el fin de propiciar el incremento de áreas permeables que permitan la retención de agua por medio de la infiltración.

6	Aumento de la cobertura arbórea	La cobertura arbórea actual se incrementa en un 40% sobre el área total de la microcuenca, priorizando la distribución de estos árboles en sistemas agroforestales, margen del cauce principal, parques urbanos y áreas recreativas.
7	Aumento de la urbanización	Se propuso evidenciar la alteración del ciclo hidrológico en un escenario perjudicial donde se incrementó un 40% la urbanización de forma masiva, sin una visión de planificación urbana sostenible que cubriría por completo la cobertura de suelo permeable disponible actualmente en la microcuenca.

La parametrización de los usos del suelo de los escenarios alternativos se describe en el siguiente cuadro (cuadro 7).

Cuadro 7. Parámetros de uso del suelo para los escenarios con IV.

Parámetros de cobertura	Área caso base (km²)	%	Área casos alternativos (km²)	%
Cobertura de árboles sobre suelo permeable	15,09	30,04	15,09	30,04
Cobertura de árboles sobre suelo impermeable	0,67	1,33	0,67	1,33
Vegetación corta	11,11	22,11	11,76	23,40
Cobertura de suelo	3,02	6,01	12,52	24,93
Cobertura de agua	0,05	0,09	0,05	0,09
Cobertura impermeable	20,31	40,42	10,15	20,21
Total	50,24	100,00	50,24	100,00

Figura 9. Representación de escenarios con implementación de celdas de biorretención, jardines de lluvia y zanjas de infiltración en distritos con IDS > 73.72% en la microcuenca el río Torres, San José, Costa Rica.

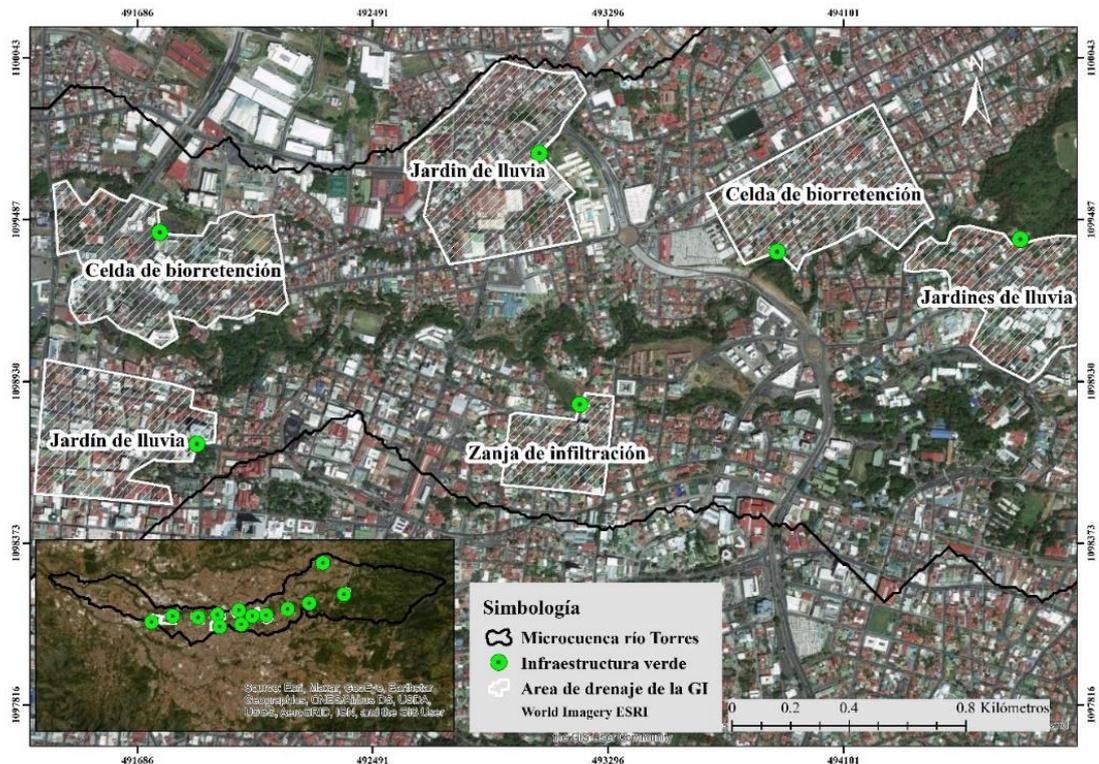


Figura 10. Representación de escenarios con implementación de techos verdes en distritos con IDS > 73.72% en la microcuenca el río Torres, San José, Costa Rica.

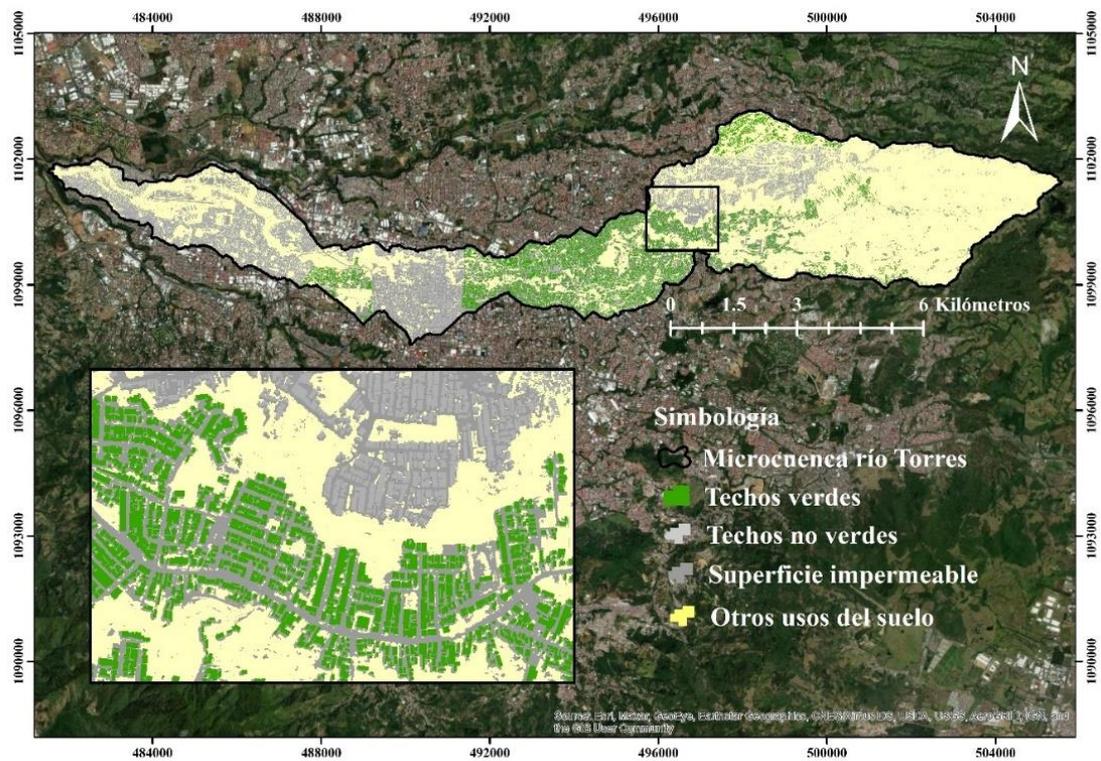


Figura 11. Representación de escenarios con implementación de pavimentos permeables en distritos con IDS > 73.72% en la microcuenca el río Torres, San José, Costa Rica.

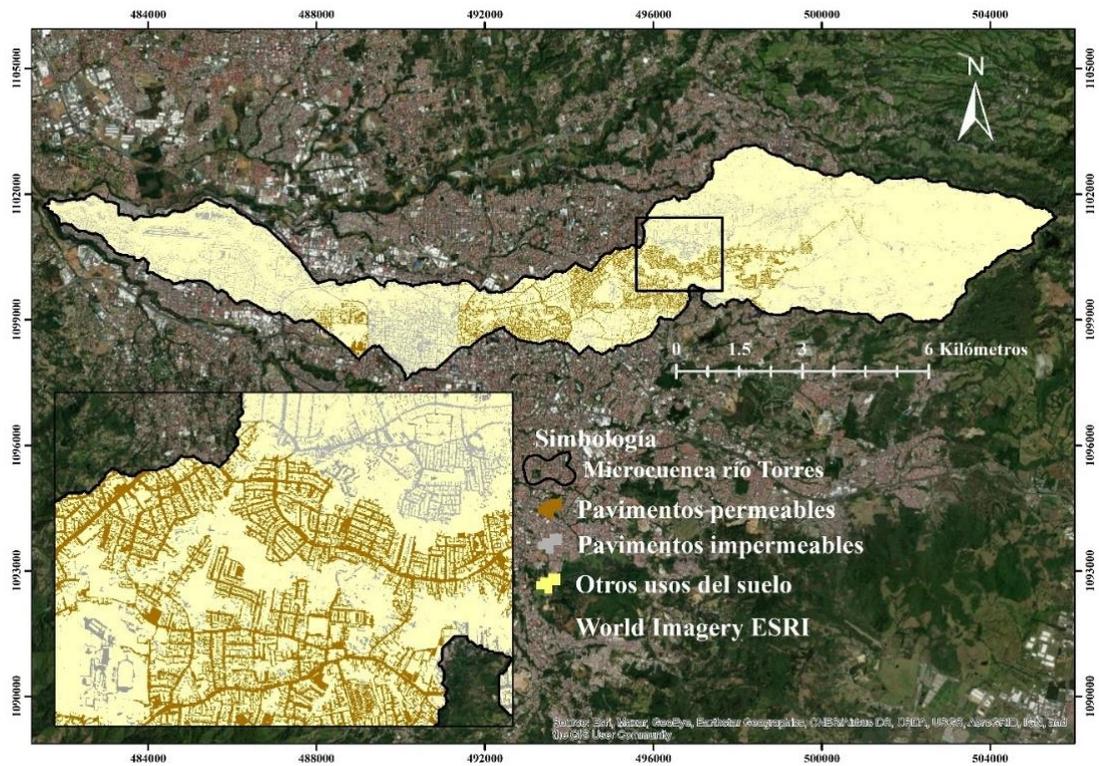


Figura 12. Representación de escenario con incremento de cobertura de árboles en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.

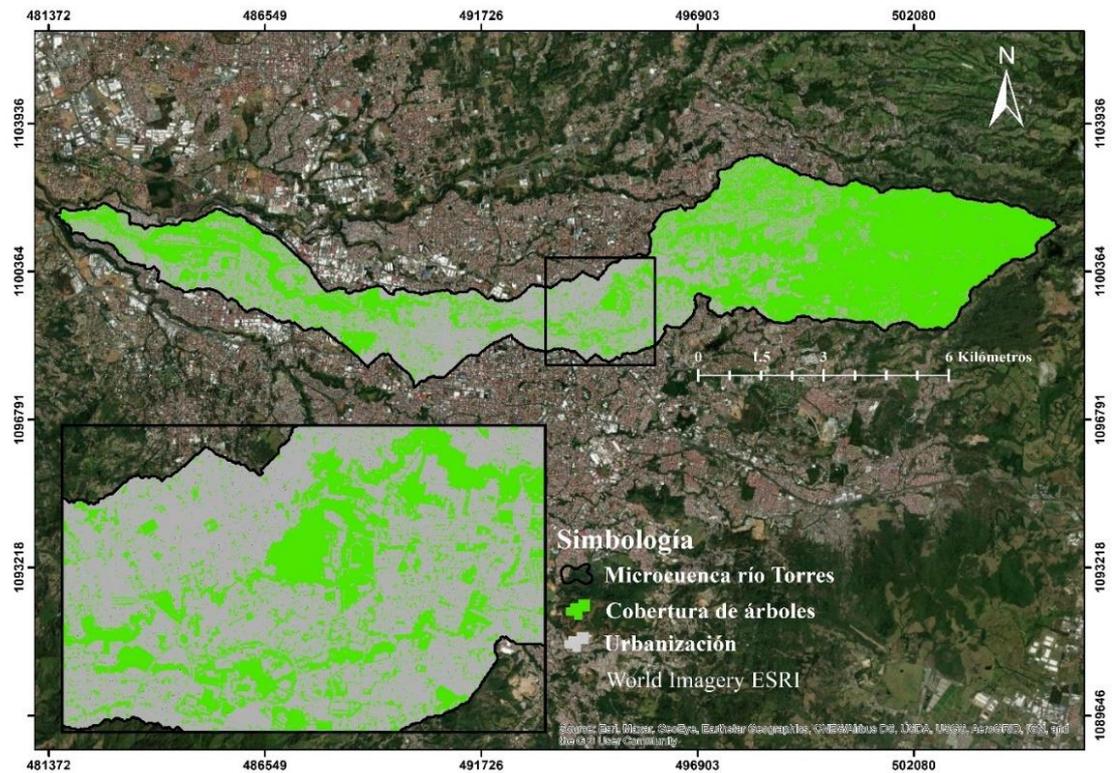
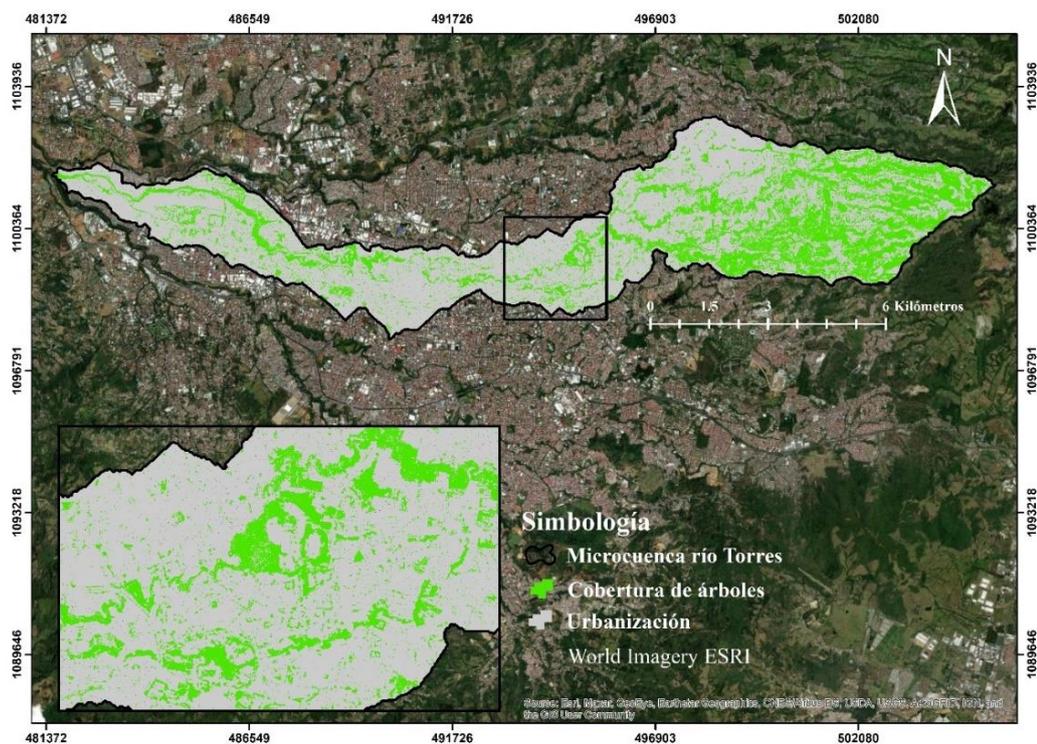


Figura 13. Representación del escenario con aumento desproporcionado de urbanización en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.



2.1.7 Calibración del caudal predicho versus el caudal observado y la determinación de la relación lluvia-escorrentía.

Para determinar la incertidumbre de la modelación, se calibró mediante la evaluación del comportamiento de caudal simulado y el caudal observado de los meses de enero a julio del 2022, debido a que solo se contaba con caudales observados de esa temporalidad. Así mismo, se realizó una evaluación del comportamiento de la relación de lluvia-escorrentía mediante las características de la cuenca y la textura del suelo. A estos procesos se les aplicó el cálculo del coeficiente de correlación Pearson “ R^2 ” para determinar el grado de asociación lineal de las variables (Di Rienzo *et al.* 2008). En este caso, la relación que existe entre los caudales simulados y observados por el método de calibración y la relación de lluvia-escorrentía que existe en la microcuenca. Este cálculo se realizó desde la función “*COEF.DE.CORREL*” de Excel.

La obtención de datos de calibración de caudal simulado y el caudal observado de los meses de enero a julio del 2022 se obtuvo mediante el aforo del río en un sitio aproximado al punto de salida del agua de la microcuenca, ya que el lugar exacto para ello es de difícil acceso por la orografía del lugar. El sitio es llamado “Los Conejos”, ubicado al noreste del vecindario Rohrmoser, en San José.

Se realizaron las mediciones a partir del 26 de marzo al 25 de julio una vez por semana y se obtiene en total 16 mediciones de caudal para, posteriormente, utilizarlo en el proceso de calibración. Además, se hizo uso del aparato OTT MF pro, creado por la compañía OTT Hydromet. Este es un medidor de caudal que mide, a través de un sensor magnético inductivo, el flujo y el nivel del agua en estaciones puntuales. Calcula automáticamente el

volumen del caudal al final de la medición conforme a las normas internacionales USGS (OTT Hydromet 2015).

En este sentido, se dice que los modelos basados en la física pueden determinarse como buenos para predecir mediante mediciones de observaciones o utilizarse en lugares no aforados, siempre y cuando sea en cuencas pequeñas (Beven y Kirkby 1979; Beven 2012).

En otras palabras, los autores pretenden expresar que no puede haber una validación absoluta de ningún modelo, ya que estos son simplificaciones relativas de las percepciones del mundo real y las consideraciones que se tomen en cuenta son suficientes para que se acepte como suficientemente preciso para un determinado fin. Por lo tanto, se toma en cuenta lo dicho por Birkel y Barahona (2019), sobre que nunca se debe esperar que los modelos, que son solo una simplificación de un sistema complejo, se ajusten perfectamente a la realidad, pero que, a pesar de ello, tienen un potencial de desarrollo futuro.

Para determinar la relación de lluvia-escorrentía mediante características de la cuenca y textura del suelo, se realizó un análisis en función de la relación de escorrentía y precipitación anual basado en el estudio de Cooper (2010), que contiene datos de escorrentía global donde se utiliza un supuesto de cuenca hidrográfica mayormente natural, es decir, con poca cubierta impermeable en el área de escurrimiento. Se construyó un escenario con un supuesto para determinar esta relación de escorrentía; en este supuesto se asume que la microcuenca tiene menos del 10% de impermeabilidad, lo cual permitió simular la respuesta del caudal por la cobertura del suelo. Los modelos conceptuales de lluvia-escorrentía son herramientas muy utilizadas en hidrología (Uhlenbrook *et al.* 1999), esto con el fin de poder aplicar un proceso para simular la transformación de la lluvia en escorrentía (Birkel y Barahona 2019).

Se disminuyó la fracción de suelo impermeable (0.042%) para anexarla a la cobertura de árboles (70.04%) y cumplir con el método de dicho estudio; de esta manera, se logró coincidir con la proporción de escorrentía que genera la relación con la lluvia. Para utilizar este método del autor Cooper (2010), se consideró la zona climática en la que se encuentra Cosa Rica, a esta se le llama “La Zona Tropical” (IMN 2017).

Por otro lado, se determinaron características hidráulicas (cuadro 8) del suelo, lo que permitió ingresar al modelo los parámetros de acuerdo con el tipo de suelo de la microcuenca según su textura. Esta relación opera bajo el marco del Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM por sus siglas en inglés), que utiliza parámetros de suelo de las propiedades de infiltración de Green-Ampt (GA) (Chow 1988), derivados de mediciones de campo y de laboratorio (Wang *et al.* 2008). El desarrollo de la ecuación de Green-Ampt (GA) para la infiltración en suelos uniformes ha demostrado ser muy útil en el campo de la ingeniería hidrológica (GSSHA 2008).

Basado en un estudio de Valverde *et al.* (2016) para la determinación de las características de suelo para Costa Rica, bajo la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), se identificó que, en la zona donde está ubicada la microcuenca, la textura del suelo es franco limoso. Con base en este tipo de suelo, se determinaron los parámetros necesarios que permitieran cumplir con la proporción de escorrentía (cuadro 8). Una vez encontrados estos parámetros, se procede a modelar la línea base que corresponde al 2021 y los escenarios futuros con cambios en la cobertura del suelo. Posteriormente, se modeló la primera mitad del año 2022 (enero a julio), con el fin de calibrar los resultados.

A continuación, se detallan los parámetros del suelo encontrados para el proceso de calibración en la modelación hidrológica con i-Tree Hydro Plus, según la clasificación textural franco limoso para la microcuenca.

Cuadro 8. Parámetros de suelo obtenidos para determinar la relación de lluvia-escorrentía en la microcuenca.⁸

Parámetro	Valor	Fuente
Almacenamiento de Depresión Impermeable	2,5	Innovyze Resource Center
Almacenamiento de Depresión Permeable	5,0	Innovyze Resource Center
Punto de marchitamiento del suelo (cm ³ /cm ³)	0,03	
Porosidad del suelo (cm ³ /cm ³)	0,51	Parámetros de infiltración del modelo
Punto de saturación del suelo (cm ³ /cm ³)	0,51	GSSHA (Análisis hidrológico de Superficie y Subsuperficie en Cuadrícula)
Succión del frente de humectación del suelo (WFS m)	0,279	(GSSHA 2008)
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	0,19	Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota
Humedad inicial del suelo	0,19	https://files.knowyourh2o.com/water-library/Stormwater/greenamp.pdf
Conductividad hidráulica kf ₀ (m/h)	0,061	Sintetizado por los autores del modelo a partir de Handbook of Hydrology (Maidment 1996).

2.2 Identificación de la viabilidad de implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), a través de actores locales de la microcuenca.

2.2.1 Proceso consultivo con los actores claves sobre las SbN por modelar

La gestión para el reverdecimiento en la microcuenca está liderada por el Comité Local (CL) del CBIRTRB. El CBIRTRB nace a través del Programa de Cuencas Hidrográficas de la Municipalidad de San José (Fernández Brenes y Sánchez Sibaja 2019) y fue nombrado a través del Decreto Ejecutivo 40043-MINAE, mediante Asamblea General convocada por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC); donde se aprueba el Plan de Gestión Estratégico Quinquenal, que fue oficializado en 2019 por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) (GIZ 2022). El CBIRTRB está compuesto por un conjunto de organizaciones de carácter voluntario para gestionar en la microcuenca; actualmente, cuenta con 24 miembros y sus suplentes.

⁸ Fuente características del suelo:

<https://files.knowyourh2o.com/water-library/Stormwater/greenamp.pdf>

https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Soil_water_storage_properties

<https://help.innovyze.com/display/xprafts/Storage+Capacities>

<https://swmm5.org/2015/07/29/rawls-brakensiek-soil-parameter-estimates-for-swmm5-and-infoswmm/>

Por lo tanto, la viabilidad de la implementación de las SbN se abordó mediante un enfoque observacional cualitativo. Se realizaron tres reuniones con los actores claves de la microcuenca y los miembros del CL del CBIRTRB; esto permitió conocer más sobre la articulación de sus funciones. También, se logró un recorrido desde la parte alta, media y baja de la microcuenca y, por último, se aplicaron unas encuestas con la finalidad de recolectar información clave y sobre la percepción que tenían ellos sobre las propuestas de SbN que se iban a modelar. Esto último se llevó a cabo a través de una conferencia en modalidad virtual-presencial, en la que se presentaron 12 personas; se les planteó el propósito de la investigación y los resultados esperados; finalizó con la aplicación de una encuesta para obtener la información esperada. Esta fue difundida y respondida en modalidad *online* en la plataforma QuestionPro⁹.

Se aplicaron 12 encuestas a los actores claves presentes de los 24 actores miembros en total del CL. Dichas personas encuestadas pertenecen al sector público, sector académico y organizaciones no gubernamentales (ONG). Entre la información solicitada, se les pidió que evaluaran cada una de las IV que se modelaron valorándolas en una escala del 0 a 5 (donde 0 es deficiente y 5 excelente), en cuanto a la viabilidad de implementación futura de estas IV.

2.2.2 Procesamiento y análisis de resultados de las encuestas

La encuesta estaba compuesta por preguntas semiestructuradas, es decir se hicieron preguntas de interés estrictamente cerradas y preguntas abiertas para que pudieran expresarse libremente. Esto permitió enriquecer los resultados obtenidos.

Posteriormente, la información recopilada se analizó desde la plataforma QuestionPro calificando las respuestas, sumando un valor porcentual; específicamente, esto se logró hacer para las preguntas cerradas, mientras que, con las preguntas abiertas, se sistematizaron las opiniones para registrar las respuestas de las personas del CL encuestadas.

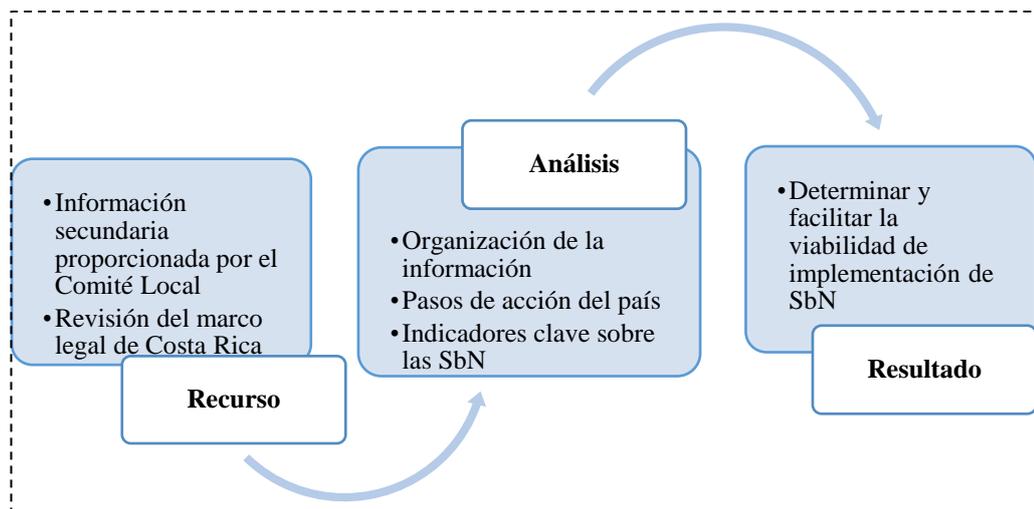
2.2.3 Proceso de validación con los actores claves sobre las SbN modeladas

El proceso de validación de resultados de la modelación se llevó a cabo mediante la revisión de las herramientas con las que actualmente trabajan los actores locales; para ello, se analizó el material compartido por los líderes del CL, en este caso, incluyendo plan de gestión quinquenal y plan operativo. Este proceso se hizo de esta forma, debido a que fue difícil coordinar un próximo encuentro con los actores claves para darles a conocer los resultados obtenidos en la modelación hidrológica y aplicar una segunda encuesta en esta segunda fase. El análisis de datos fue un proceso de exploración, transformación y examinación de datos para identificar cuáles son los tipos de IV que tienen mayor aprobación para su implementación, a partir de las acciones que ya se están realizando en la microcuenca.

Además, se realizó una revisión del marco jurídico nacional de Costa Rica para identificar el panorama que existe en relación con la viabilidad de la implementación futura de SbN en el país y, sobre todo, en la microcuenca interurbana del río Torres.

Figura 14. Proceso para determinar la viabilidad de la implementación de IV en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.

⁹ Plataforma en línea para elaborar y procesar encuestas.
<https://www.questionpro.com/a/listSurveys.do>



3. RESULTADOS

3.1 Comportamiento de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el servicio ecosistémico hídrico de la microcuenca interurbana

3.1.1 Parámetros requeridos para la modelación hidrológica

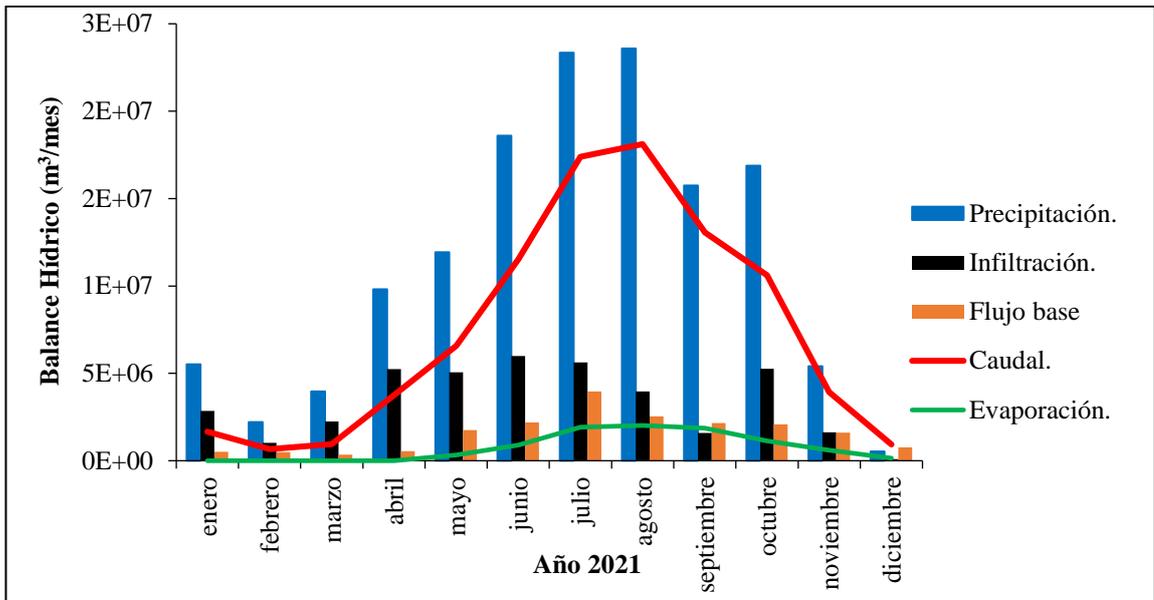
Los parámetros necesarios requeridos por el modelo i-Tree Hydro Plus para determinar el objetivo principal de esta investigación son los que están directamente involucrados en el ciclo de agua; específicamente, en el comportamiento hidrológico en el que se ven involucrados el clima, el suelo y el caudal observado descritos detalladamente en el estudio realizado por Hirabayashi y Endreny (2016).

3.1.2 Potencial de generación de esorrentías en la microcuenca en estado actual del balance hídrico.

El resultado del balance hídrico fue generado a partir de los datos horarios de precipitación y evapotranspiración. La infiltración, el caudal, el flujo base y la evaporación son los componentes del balance hídrico originados por medio de la simulación (figura 15).

$$\text{Balance hídrico general } mm = 2737,28 \text{ mm} - 150,5 \text{ mm} - 808,04 \text{ mm} - 1401,13 \text{ mm} - 377,61 \text{ mm} = 0,00 \text{ mm}$$

Figura 15. Régimen del balance hídrico anual generado para el caso base en la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.

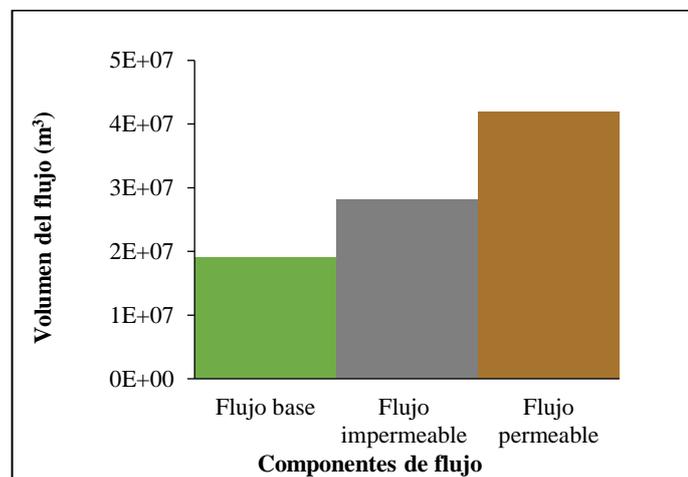


El comportamiento promedio mensual del balance hídrico que varía durante todo el año se manifiesta y da como resultado mayor acumulación de lluvia y generación de escorrentía superficial en los meses de julio y agosto; de la misma manera, se experimentan mayores caudales para el mes de julio. Se encontró que hubo mayor infiltración en junio y mayor evaporación en agosto. Este resultado coincide con la época lluviosa para la región de la vertiente del pacífico que va de mayo a octubre, y en menor cantidad de volumen de agua en el balance hídrico, se reporta para los meses de época seca que van de diciembre a marzo, siendo abril y noviembre los meses de transición (IMN 2017).

Para las condiciones de uso del suelo y clima del caso base, el resultado del balance hídrico de las escorrentías generó un flujo en términos de volumen para toda la microcuenca de un 47% del flujo que corresponde al flujo permeable; un 32% de flujo impermeable y se generó un 21% de flujo base. Estos porcentajes conforman un volumen total de 89.175.455,51 m³ que escurrió en toda el área de la microcuenca durante el 2021 (figura 16).

$$\begin{aligned} \text{Balance hídrico de escorrentías mm} &= 1775,2 \text{ mm} - 560,50 \text{ mm} - 836,99 \text{ mm} + 377,61 \text{ mm} \\ &= 0,00 \text{ mm} \end{aligned}$$

Figura 16. Cantidades de flujos generados en el balance hídrico del caso base de la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica.



Cuadro 9. Resultados de los componentes del flujo para el caso base

Predicciones de la simulación	Volumen del flujo (m³/año)	%
Flujo base	1,90E+07	21,00
Flujo permeable	4,19E+07	47,00
Flujo impermeable	2,82E+07	32,00
Flujo total	8,92E+07	100,00

El resultado de los flujos para el 2021 está directamente relacionado con la cobertura del suelo. La microcuenca cuenta con un 40,4% de superficies impermeables compuestas por viviendas, edificios y carreteras asfaltadas; y alrededor de 59,5% de superficies no impermeables, es decir, cobertura de árboles, de arbustos, pastos, suelo desnudo o plantaciones de café, entre otras, que componen un mayor porcentaje de superficies permeables, por lo que provoca un resultado mayor de flujo permeable. Sin embargo, a pesar del menor porcentaje de área impermeable, las incidencias de inundaciones cada vez son más comunes, principalmente, en la época lluviosa (mayo a octubre).

3.1.3 Escorrentía evitada asociada a los cambios en la cubierta terrestre en escenarios alternativos

Al analizar la tendencia del comportamiento de los flujos de agua en escenarios con implementación de infraestructuras verdes, se evidencia que hay una disminución en las cantidades de los flujos hídricos al implementar las IV. Sin embargo, para el escenario con incremento de cobertura arbórea, el comportamiento de los flujos mantiene una respuesta similar al caso base (figuras 17). Sucede el efecto contrario en la cantidad de los flujos cuando se tiene un escenario con incremento de la urbanización para los flujos tanto permeable como impermeable y base.

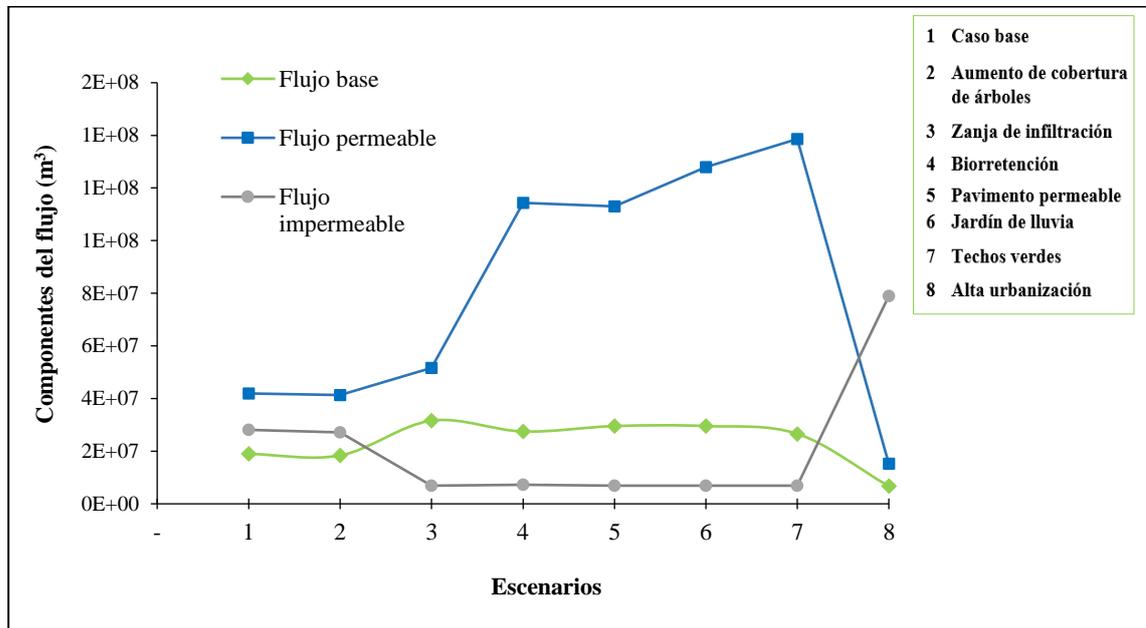
Cuadro 10. Resultados de los componentes del flujo en escenarios con implementación de IV.

Escenario	Predicciones de la simulación (m³)		
	Flujo base	Flujo permeable	Flujo impermeable
Caso base	1,90E+07	4,19E+07	2,82E+07
Aumento de cobertura de árboles	1,84E+07	4,13E+07	2,71E+07
Zanja de infiltración	3,16E+07	5,16E+07	6,90E+06
Celdas de biorretención	2,75E+07	1,14E+08	7,25E+06
Pavimento permeable	2,95E+07	1,13E+08	6,90E+06
Jardín de lluvia	2,95E+07	1,28E+08	6,90E+06
Techos verdes	2,66E+07	1,39E+08	6,90E+06
Alta urbanización	6,70E+06	1,52E+07	7,90E+07

El resultado de la modelación para los componentes del flujo expresado en volúmenes de metros cúbicos estima la variación de los flujos a lo largo de los diferentes escenarios de implementación de infraestructuras verdes, mostrando una contribución para el aumento del flujo permeable y base. Se da un comportamiento similar en el aumento del escenario con aumento de cobertura de árboles y se demuestra lo contrario en el flujo impermeable que

aumenta cuando se tiene un incremento desmedido de urbanización, como se muestra en la siguiente figura 17.

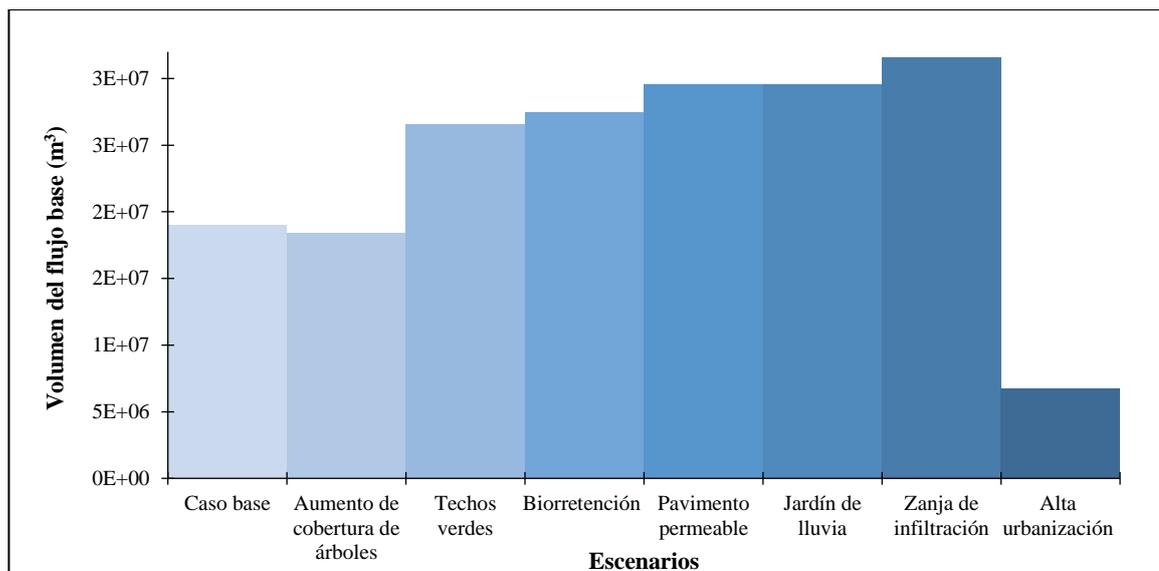
Figura 17. Componentes de los flujos generados por escenarios modelados con IV en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.



3.1.4 Comparación de los tipos de flujo por cada infraestructura verde modelada

En las siguientes figuras de esta sección, se muestra el comportamiento del flujo permeable, impermeable y base a lo largo de los escenarios con cambios de uso del suelo con IV que han sido sometidos a una modelación hidrológica.

Figura 18. Generación de flujo base por escenario modelado con IV, incremento de cobertura de árboles y alta urbanización en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.

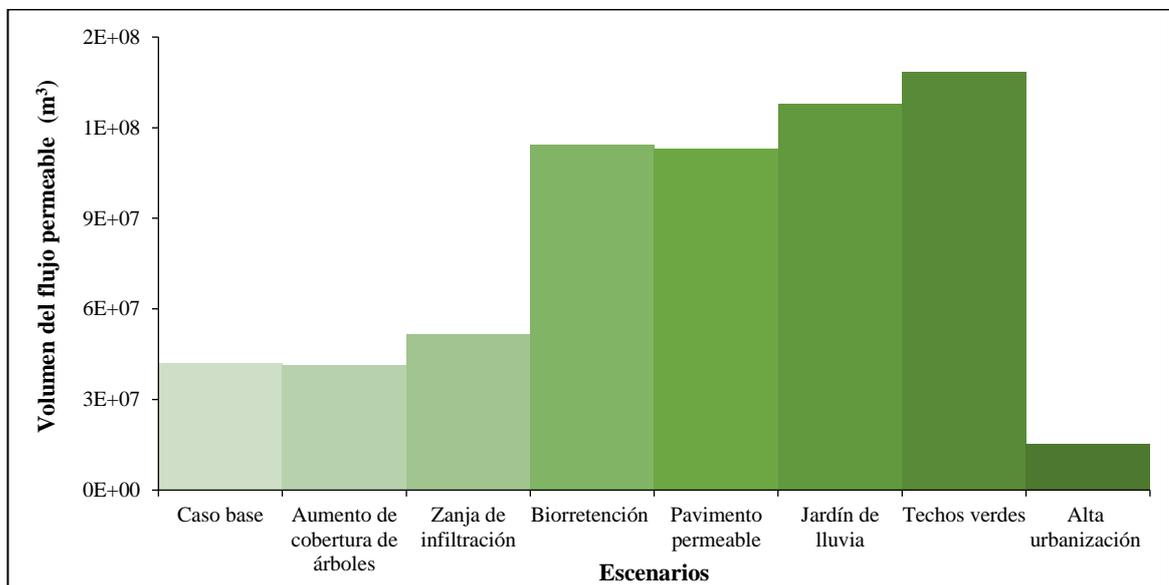


Los resultados del comportamiento hidrológico muestran el flujo base obtenido por cada escenario modelado. Este se caracteriza por ser la porción del flujo que proviene de las aguas

subterráneas, pero que, su vez, puede provenir de numerosas fuentes (Hall R. 1968). En este sentido, gran aporte al caudal puede ser proveniente de las aguas residuales.

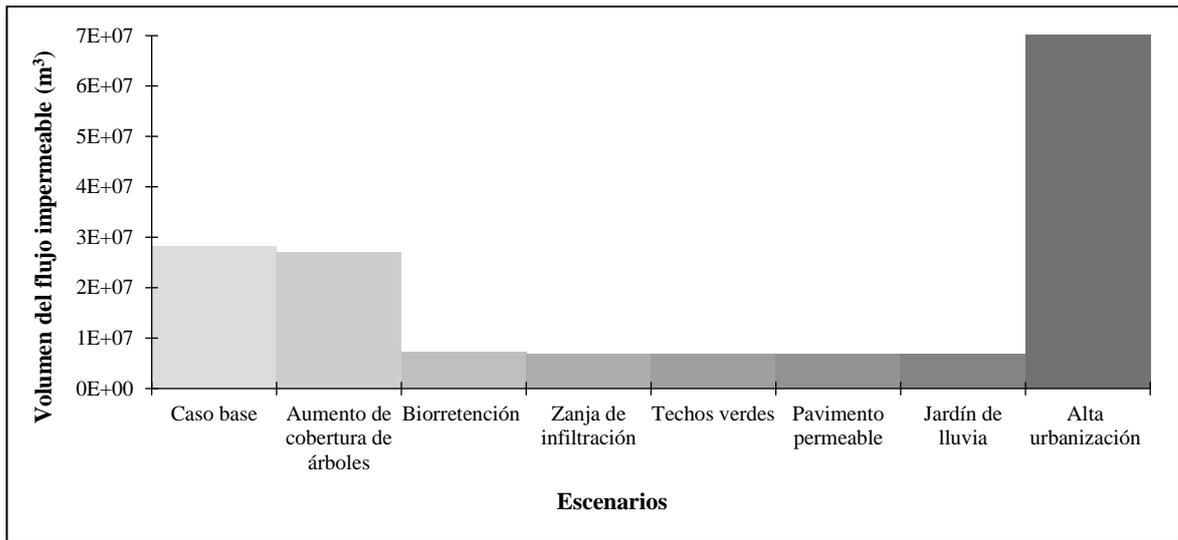
El comportamiento anual de flujo base por cada escenario revela un comportamiento diferente, pero todas las IV muestran un efecto positivo para incrementar los volúmenes de flujo base comparado con el punto de referencia (caso base). Se estima un incremento del flujo base al implementar las IV, donde se obtienen diferentes resultados, siendo las zanjas de infiltración las que más contribuyen con el aumento del flujo base, incrementándose a un 35% durante el año en cuestión. Caso contrario se reporta al aumentar la cobertura arbórea, donde el flujo base es inferior por cifras decimales, manteniéndose dentro de un 21%. Adicionalmente, se evidencia que, cuando existe un incremento de la urbanización, el flujo base disminuye a un 7%. Este es un resultado que pondría en riesgo el volumen de agua del caudal base que se le proporciona al cauce a lo largo de un periodo seco.

Figura 19. Generación de flujo permeable por escenario modelado con IV, incremento de cobertura de árboles y alta urbanización en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.



El flujo permeable en el escenario base es de 47% y existe una mayor contribución a este con los escenarios de implementación de los techos verdes, alcanzando un 80%; seguidamente, el jardín de lluvia con 78% y las celdas de biorretención con un 78% en relación con el caso base. Consecutivamente, se encuentra el pavimento permeable con un aporte al flujo permeable del 75% y las zanjas de infiltración con 57%. Para el escenario del incremento de cobertura de árboles, el flujo permeable disminuye levemente, manteniéndose dentro del 47% en relación con el caso base. Sin embargo, se genera una disminución al 15% en un escenario de incremento de urbanización.

Figura 20. Generación de flujo impermeable por escenario modelado con IV, incremento de cobertura de árboles y alta urbanización en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.

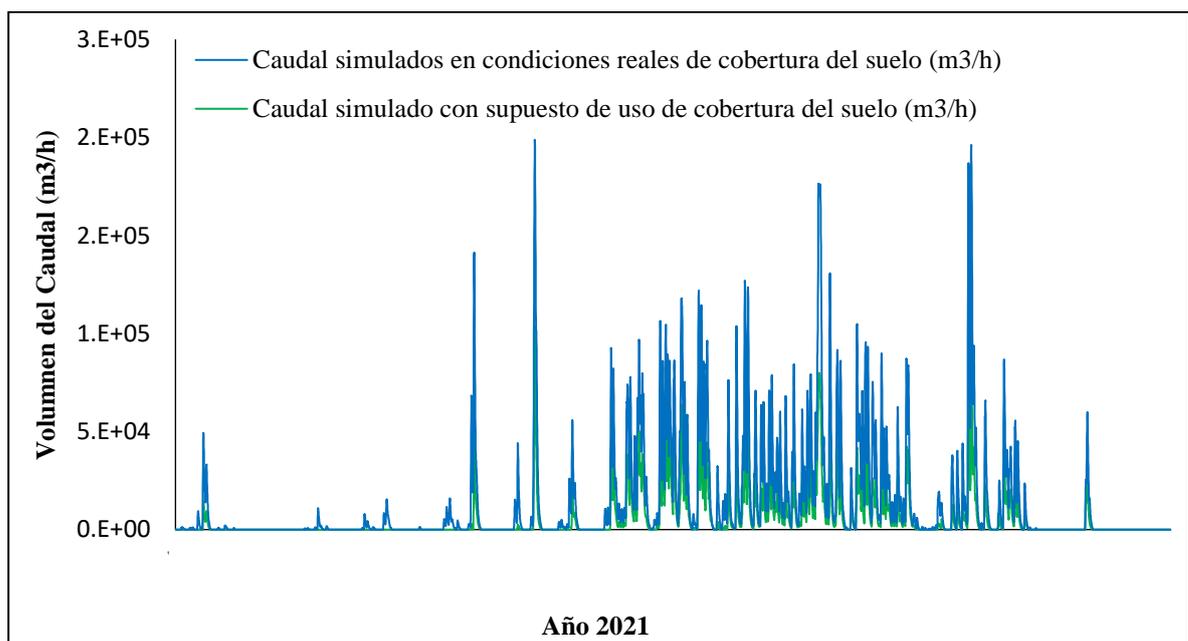


El mayor impacto en la disminución de flujo impermeable es, en promedio, de 5% por cada escenario de implementación de IV: celdas de biorretención, zanjas de infiltración, techos verdes, pavimentos permeables y jardines de lluvia. Además, el escenario de incremento de cobertura de árboles sigue comportándose de manera similar al caso base con un porcentaje de flujo impermeable de 32%. Sin embargo, en un escenario de incremento de la urbanización descontrolado, este flujo se incrementa a un 78% en relación con el caso base.

3.1.5 Resultados de la calibración del modelo

El resultado del análisis del caudal simulado a través del escenario basado en el supuesto de cobertura del suelo versus el comportamiento del caudal simulado en las condiciones reales mostró que existe una relación de lluvia-escorrentía del 0,55 (ver figura 21), encontrándose dentro del rango para Costa Rica (0,4 a 0,6).

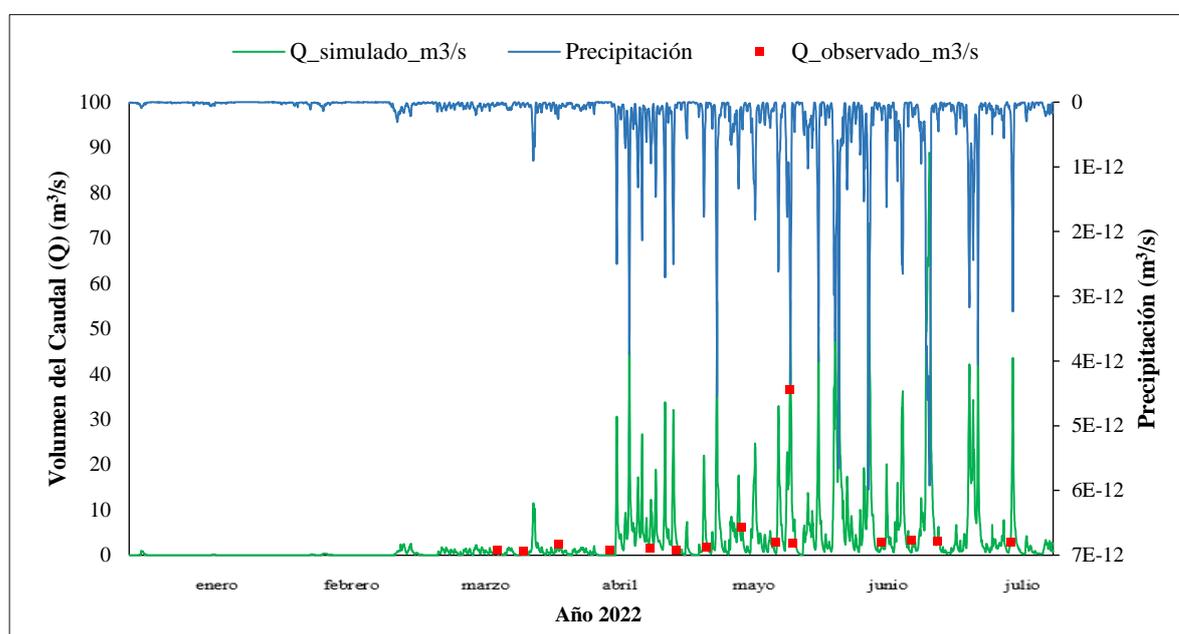
Figura 21. Comportamiento del caudal simulado en escenario de supuesto de cobertura del suelo y en condiciones reales de la cobertura del suelo en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.



Esta simulación de la relación de lluvia-escorrentía se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson para determinar la relación que existe en el caudal simulado del escenario basado en el supuesto de cobertura de suelo con el simulado en las condiciones reales de la cobertura del suelo de la microcuenca. Se utilizó la función de Excel “*COEF.DE.CORREL*”¹⁰ y se obtiene cómo resultado un $r^2 = 0,93$, lo que indica una correlación positiva entre ambos.

Por otro lado, se obtuvo el siguiente resultado de calibración del modelo, donde se compara el caudal simulado para los meses de enero a julio del 2022, con el caudal observado mediante el aforo del río *in situ* (figura 22). Esta simulación se utilizó para demostrar la relación que existe en el balance de agua simulado con el observado para efectos de calibración.

Figura 22. Precipitación y comportamiento del caudal simulado en relación con el caudal observado de enero a julio del 2022 en la microcuenca río Torres, San José, Costa Rica.



Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson para estimar la relación que existe en el caudal simulado con el observado; para ello, se modeló de manera complementaria para propósitos de calibración, los meses de enero a julio del 2022, ya que los caudales observados que se tenían fueron de dicho periodo. De la misma manera, se utilizó la función de Excel “*COEF.DE.CORREL*” y se obtiene como resultado un $r^2=0,98$. Este dato indica una relación estrecha (Di Rienzo *et al.* 2008), por lo que disminuye la incertidumbre en el desempeño del modelo para la simulación entre el caudal simulado y el caudal observado.

3.2 Potencial de aceptación de los resultados del modelado hidrológico para su implementación

3.2.1 Proceso de consulta con actores claves de la microcuenca

Los resultados de la consulta social a través de las encuestas aplicadas a los actores claves evidencian que, actualmente, existe un importante interés en el desarrollo sostenible que ha permitido una gestión que incluya SbN en la planificación urbana.

¹⁰ <https://support.microsoft.com>

La encuesta se aplicó a un grupo de 12 personas de 24 actores miembros en total, todas pertenecientes al CL del río Torres. Este es un grupo multidisciplinario en el que participan diferentes instituciones, principalmente, se contó con la participación de las municipalidades, academias, y organizaciones no gubernamentales y cooperación internacional. El margen de error se obtuvo dividiendo la desviación estándar (σ) entre la raíz cuadrada del tamaño de la muestra (n), multiplicado por el valor del nivel de confianza (z) de 1,96; lo que corresponde a un margen de error de 20,43 % con un nivel de confianza de 95%¹¹.

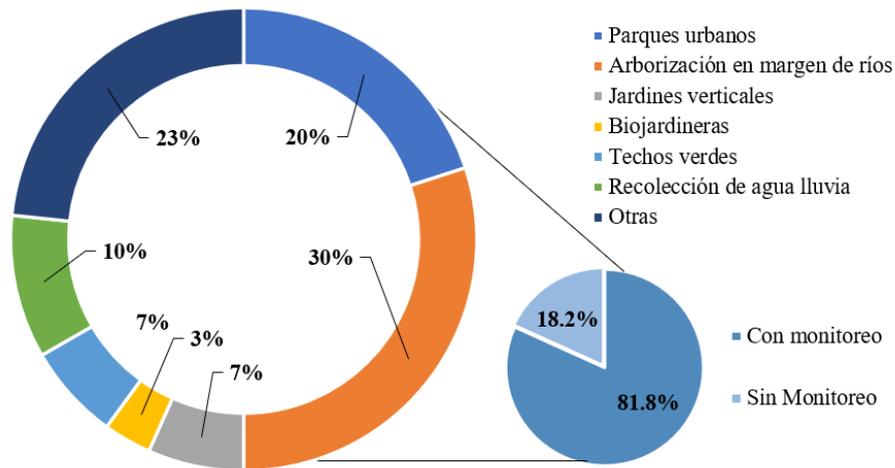
Cuadro 11. Sectores del CL que participación en las encuestas aplicadas

Institución/Organización	Sector
Huertas Donde Sea	ONG
Fundación Pro-Zoológicos	ONG
Municipalidad de San José	Sector público
Municipalidad de Tibás	Sector público
Municipalidad de Goicoechea	Sector público
Universidad Nacional (UNA)	Sector público
Universidad de Costa Rica (UCR)	Sector público
Universidad para la Cooperación Internacional (UCI)	Sector privado
Tecnológico de Costa Rica	Sector público
Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ)	Cooperación internacional/Especialista técnico
Río Urbano	ONG
Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, del Ministerio de Ambiente y Energía (DIGECA-MINAE)	Sector público

Entre los resultados obtenidos, indican que estos actores ya están aplicando prácticas de reverdecimiento urbano como parques urbanos, arborización en el margen del río Torres, jardines verticales, biojardineras, techos verdes, recolección de agua lluvia, entre otras a pequeña escala (ver figura 23). Estas prácticas han surgido por la necesidad de protección, prevención de riesgos a desastres de origen hídrico y para proveer servicios ecosistémicos, dando paso a que se instauraran políticas y programas institucionales de gestión ambiental para mejorar la calidad ambiental en las ciudades.

Figura 23. Buenas prácticas actualmente desarrolladas por el CL del río Torres.

¹¹ El margen de error fue obtenido de la plataforma QuestionPro <https://www.questionpro.com/es/calculadora-de-margen-de-error.html>

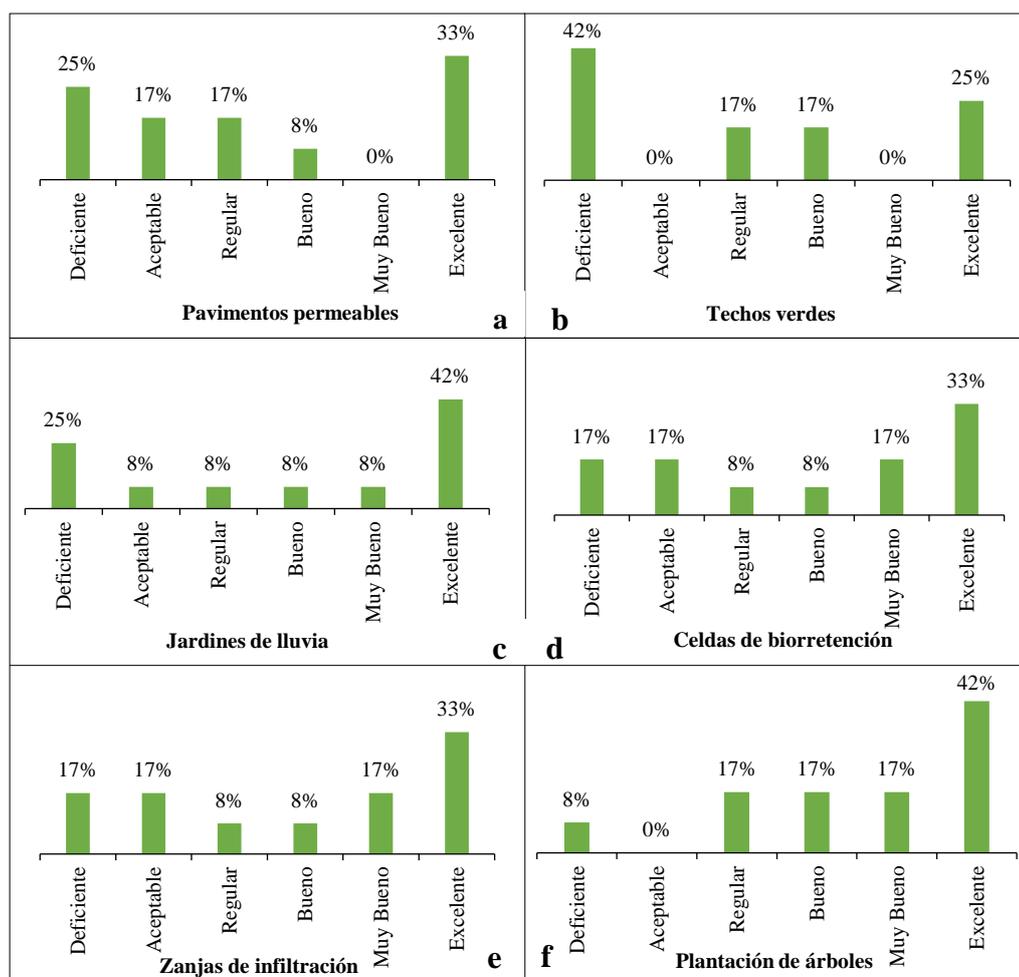


En su mayoría, el financiamiento para ello se ha logrado a través de proyectos de cooperación externa que buscan fortalecer la gestión de los planificadores urbanos. Estas prácticas cuentan con un monitoreo del 81,8% a cargo de las instituciones que las gestionaron o establecieron. Mientras que un 18,2% de estas SbN tienen un seguimiento itinerante y pausado, debido a limitaciones financieras y deficiencias en el manejo de presupuesto.

Por otro lado, los actores han tenido aprendizajes y resultados importantes como la recuperación de áreas de protección, la construcción de un Protocolo de Rehabilitación Ecológica en Áreas de Protección en la GAM aprobado por el SINAC en el 2015; fortalecimiento de los indicadores del Plan de Gestión Ambiental Institucional (PGAI) Decreto Ejecutivo No. 36499-S-MINAET (MINAET – Ministerio de Salud 2011); sensibilización y renovación cultural de la población; fortalecimiento en proyectos de investigación y surge una buena aceptación por parte del sector público y privado originando un cambio en avances tecnológicos puntuales, para que estos sean más amigables en diferentes aspectos ambientales (agua, combustible, energía, residuos, etc.).

Un 92% de los actores consultados manifestó su interés por conocer los resultados de esta investigación. Sin embargo, explicaron que, aun siendo positivos los resultados de la contribución de las IV evaluadas por i-Tree Hydro Plus para mejorar los entornos urbanos, las instituciones a las que ellos representan únicamente en un 55% estarían interesadas en llevarlas a cabo. Esto se debe a que aún existen muchas limitaciones para fortalecer estas implementaciones de tipo infraestructuras verdes y que es necesario contar con bases estables de financiamiento o presupuesto municipal, capacitación técnica sobre las IV, gestionar/promover a través de una ley, normativa u ordenanza que facilite esta implementación.

Figura 24. Evaluación de escenarios por el CL para la implementación de escenarios en la modelación hidrológica



Los resultados de las evaluaciones a las IV mostraron que tienen mayor aceptación y viabilidad de implementación los jardines de lluvia (figura 24c) y el incremento de árboles (figura 24f) con un 42% para ambas IV. Seguidamente, los pavimentos permeables (figura 24a), las celdas de biorretención (figura 24d) y zanjas de infiltración (figura 24e) con un 33%. Sin embargo, también comentaron que los techos verdes en un 42% (figura 24b) tienen menor aceptación y viabilidad de implementación.

Adicional a estas propuestas de IV, los actores sugieren, basándose en sus experiencias, que se considere también la implementación de alternativas como las biojardineras, jardineras para polinizadores, humedales para disminuir la carga de contaminantes, fortalecimiento del arbolado urbano con especies pioneras que aporten más y mejores servicios ecosistémicos. Sin olvidar que también indicaron que es importante fortalecer las capacidades de los entes responsables de esta gestión en las prácticas que se propongan implementar.

3.2.2 Proceso validación social

Se analizó la información primaria que fue proporcionada por uno de los co-coordinadores del CL del río Torres y la información jurídica vigente en el marco constitucional (ver figura 25), para obtener una visión real del potencial de aceptación que tienen los resultados de las SbN modeladas, específicamente las IV consideradas en esta propuesta. Del análisis se puede inferir que el CL cuenta con bases muy sólidas de un modelo de gestión que le permiten desempeñar sus actividades, en su mayoría, con mucho éxito, reconocimiento y aceptación en su espacio de acción; a esto se le atribuye que su misión es velar por una conservación

integral y la conectividad de los ecosistemas de la microcuenca del río Torres para el disfrute sano e incluyente de los beneficios de las SbN urbanas para las diferentes formas de vida (CBIRTRB 2020).

En los procesos y prospectivas del CL, se encontraron ciertos aspectos vinculantes que se conciben como una ventaja más para la viabilidad de la implementación, refiriéndose a que trabajan con acciones innovadoras bajo el concepto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). En este sentido, la presente investigación permite dar un valor agregado, al evidenciar los efectos que tienen en el servicio ecosistémico hídrico algunas IV representativas, con los resultados de la modelación hidrológica. No obstante, con miras hacia el futuro, se tiene un potencial de partida fértil para comenzar con la experimentación de ejemplos de SbN, con el fin de que puedan ser monitoreados para su posterior cuantificación.

Existen normas urbanísticas en los planes reguladores municipales que reglamentan ciertas actividades en pro de la conservación ambiental que permitan un crecimiento urbano sostenible. Sin embargo, la ausencia de la aplicabilidad efectiva en la planificación urbana y territorial, acompañada de factores de orden cultural, son los elementos contribuyentes más importantes que generan problemáticas que atentan contra la conservación de la biodiversidad (CBIRTRB 2020).

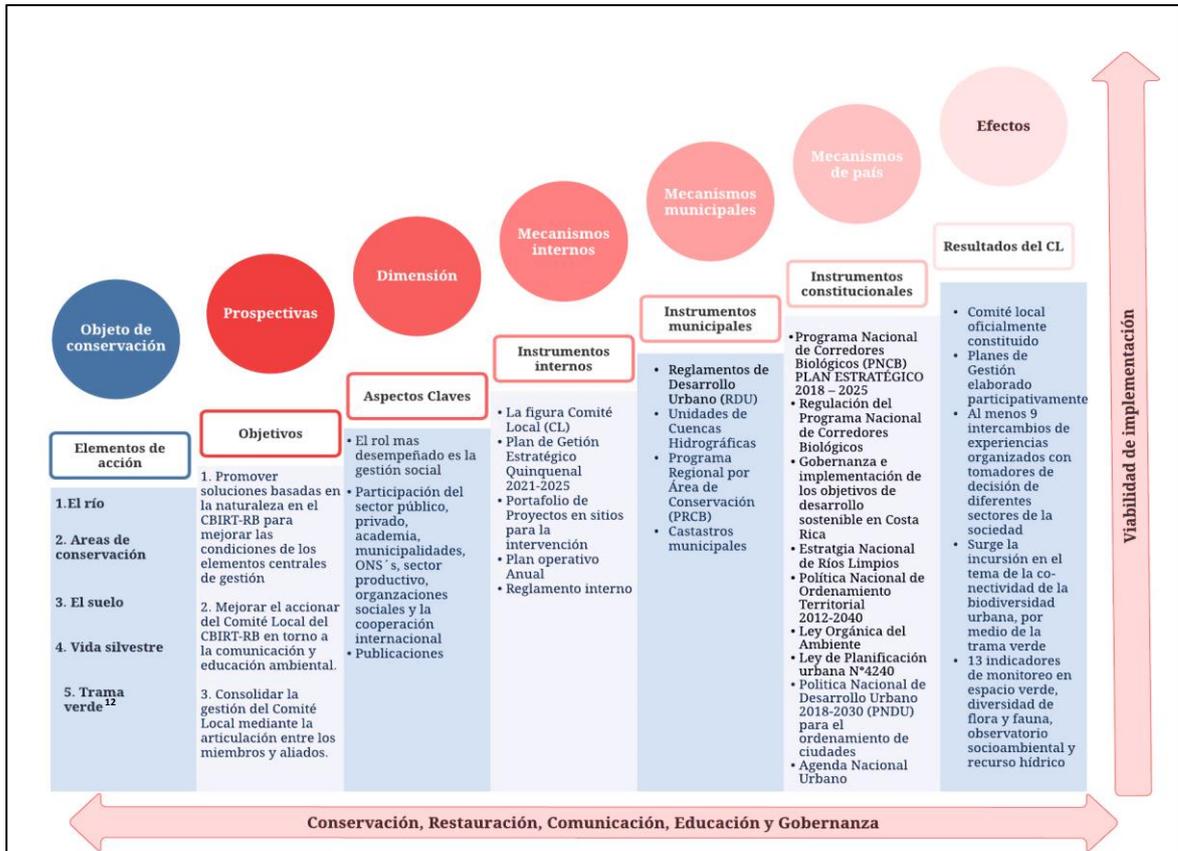
En lo establecido en el marco institucional, existen muchas herramientas jurídicas y legales que buscan contribuir siguiendo la ruta de construir ciudades sostenibles. Esto se puede encontrar en los diferentes instrumentos existentes para Costa Rica que proponen acciones encaminadas a aumentar los espacios verdes existentes y que han sido generadas bajo un amplio proceso participativo de todos los sectores de la sociedad.

En temas relacionados con la Agenda 2030 de la ONU, Costa Rica se encuentra entre los países comprometidos para implementar acciones que propicien cumplir con las metas, dado que fue el primer país del mundo en firmar el pacto nacional a favor de los ODS (Pennington y Angulo 2019). El alcance que hoy se ha visto es gracias al trabajo en conjunto con las diferentes entidades de la sociedad civil, público, privado, económico, social, cultural, legislativo, ONG, gobiernos locales, entre otros, en coordinación con el sistema de las Naciones Unidas que reside en el país. Puntualmente, el resultado de esta investigación se da en un momento oportuno para contribuir con lo relacionado con el ODS 11, donde se propone crear ciudades y comunidades resilientes y sostenibles (ONU 2015).

Según lo establecido en el diagnóstico social para el Plan Regulador del cantón de Goicoechea, las urbanizaciones cuentan con pocas áreas verdes; otros cuentan con espacios públicos diversos, pero que no poseen mantenimiento. Además, en cuanto a amenazas naturales, ocurren algunos deslizamientos e inundaciones en las cercanías de quebradas. También se menciona que urge un llamado de atención para que el desarrollo del cantón vaya en concordancia con las zonas productoras de agua, ya que existe preocupación por el establecimiento de condominios habitacionales (ProDUS-UCR 2020).

En la siguiente figura (figura 25), se muestra la situación actual en cuanto a herramientas y aspectos importantes que indican la presencia de una fuerza vital concreta para determinar si existe viabilidad de implementación futura de SbN en la microcuenca, con el fin último de responder a diversos desafíos provenientes del crecimiento de las ciudades y la demanda de servicios ecosistémicos urbanos para las presentes y futuras generaciones.

Figura 25. Sistematización de la viabilidad de implementación de IV en la microcuenca del río Torres.¹²



¹² Trama verde: entendida esta como la interconexión de parques, áreas verdes, calles y avenidas arborizadas, línea férrea, isletas y bosques a orillas de ríos (ripario) (CBIRT-RB 2020).

4. DISCUSIÓN

3.3 Desempeño del modelo i-Tree Hydro Plus para representar las características hídricas en la microcuenca del río Torres

La principal función del modelo i-Tree Hydro Plus es cuantificar la generación de escorrentías cuando se tienen modificaciones efectivas de uso del suelo que promuevan mejores condiciones; y también cuando existen alteraciones antrópicas con resultados negativos de gran magnitud, como sería la urbanización descontrolada. Las estimaciones de los resultados de los modelos utilizados para el diseño y manejo de las aguas pluviales dependieron de la calidad de datos suministrados para simular un comportamiento similar al caso real (Rivero *et al.* 2020). Para ello, la información meteorológica proveniente de las estaciones circundantes a la zona de estudio, la clasificación de uso del suelo del Atlas Verde y los datos de aforo del río son la información representativa que permitió representar razonablemente las características hídricas en materia del manejo de las aguas pluviales.

La calidad de estos resultados se le atribuye a la evolución que ha tenido este modelo desde hace ya varios años. Desde el punto de vista técnico, el modelo i-Tree Hydro Plus en los inicios de su diseño fue orientado para describir los procesos hidrológicos en las cuencas utilizando un enfoque OBJTOP (OBJect oriented, TOPographic based model), con un enfoque compuesto por cinco subobjetos: precipitación, evapotranspiración, vegetación, suelo y cauce (Wang *et al.* 2005). En relación con esto, los autores Hirabayashi y Endreny (2016) afirman que las herramientas i-Tree del Servicio Forestal de EE.UU. utilizan parámetros clave de bosques urbanos, datos meteorológicos y de ubicación para cuantificar los beneficios que se obtienen de la vegetación urbana.

En este sentido, Bautista y Peña-Guzmán (2019) mencionan que el modelo i-Tree Hydro está diseñado con algoritmos bien desarrollados para que los requisitos de entrada sean mínimos para facilitar la aplicación en zonas urbanas. Esto ha precisado conocer los efectos climáticos, el consumo de agua por la vegetación, la distribución de agua sobre la superficie y el subsuelo (Ochoa *et al.* 2022), ya que, para cada tipo de IV, el balance hídrico representa los efectos de la atmósfera, la vegetación, la cobertura terrestre y el suelo, incluido la intercepción de dosel, almacenamiento en depresión, evaporación y evapotranspiración, infiltración y la humedad del suelo (Abdi 2019).

Desde este punto de vista de la hidrología urbana, existen modelos como el P8 UCM (Urban Catchment Model) que ha sido desarrollado para el diseño y evaluación de esquemas para el tratamiento de escorrentías, donde estos esquemas son llamados Mejores Prácticas de Gestión (BMP, por sus siglas en inglés) para los desarrollos urbanos; además de simular las escorrentías de superficies permeables e impermeables, predice el transporte de contaminantes (Walker 1990). De igual manera que el modelo i-Tree Hydro Plus, este está basado en datos de entrada como el índice topográfico, precipitación y temperatura, tomando en cuenta áreas de almacenamiento de escorrentías (Walker 1990).

Por otro lado, el modelo Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation (MUSIC) fue desarrollado y utilizado ampliamente en Australia para gestionar el impacto del desarrollo urbano y cambios de usos del suelo sobre el cauce principal con prácticas llamadas Sistemas de Diseño Sensibles al Agua (WSUD, por sus siglas en inglés). Este modelo ha demostrado ser capaz de estimar los volúmenes de escorrentía de las aguas pluviales en zonas urbanizadas (Wong *et al.* 2002).

Así mismo, el modelo Storm Water Management Model (SWMM) también ha sido diseñado para reproducir fenómenos de escorrentía urbana como respuesta de una cuenca, partiendo de datos de precipitación, otros parámetros meteorológicos (intensidades y duración de las lluvias, temperatura) y físicos (red hídrica, área de la cuenca, rugosidad, zonas permeables e impermeables, y parámetros de infiltración), que caracterizan la cuenca (Roesner 2009). También cuenta con la capacidad de simular dispositivos de IV para control de escorrentías, donde se les denomina controles de Desarrollo de Bajo Impacto (LID, por sus siglas en inglés) (Addi 2019).

El resultado del modelo ha demostrado ser eficaz para dar a conocer los volúmenes de flujo que se generan en los medios urbanos utilizando información propiamente de la zona, así como ha determinado la reducción del flujo cuando se implementan IV para el tratamiento de las aguas pluviales. En este sentido, el modelo permite ser adaptado a las condiciones climáticas de la región a la que se aplique, ya que se le puede integrar información proveniente del sitio de estudio y, en este caso, se contó con información muy representativa de la zona.

3.4 Potencial de generación de escorrentía a partir del balance hídrico obtenido para la microcuenca Río Torres

A partir del balance hídrico obtenido para las escorrentías, da a conocer que se produjo un volumen de flujo mayor en la generación de escorrentías sobre área permeable (47%) frente al volumen de escorrentías sobre áreas impermeables (32%); además, se produjo un volumen de flujo base considerable (21%). Esto puede ser explicado, ya que existe un mayor porcentaje de áreas permeables, debido a que se fusionan en un tipo de cobertura las áreas de bosque, cultivos perennes como los cafetales en plantaciones forestales presentes en la zona, pastizales y terrenos baldíos. Esto se vuelve interesante desde el punto de vista de la ocurrencia de inundaciones, ya que son notables las incidencias en algunos cantones ubicados dentro de la microcuenca; esto se reporta con mayor frecuencia a través de los medios de comunicación y muy poco en la literatura. En esta ocasión, fue muy útil estimar el balance hídrico para cuantificar la cantidad del recurso agua en la microcuenca y sus componentes hidrológicos que permiten evaluar los elementos relevantes del sistema hidráulico en la cuenca (Gómez-Reyes 2014).

En un estudio realizado por Salgado (2009), define que era urgente una agenda para el uso y aplicación de conocimientos en materia de amenazas y vulnerabilidad para el periodo 2010-2025 sostenida en medidas de prevención y mitigación, de lo contrario, preveía complicaciones en materia de riesgos a desastre en Centroamérica y Costa Rica. Esto quiere decir que, aunque esta escorrentía impermeable (31%) es inferior a la permeable (47%), no ha dejado de ser un problema, sobre todo, en la parte media baja de la microcuenca en cuanto a las incidencias de las inundaciones. A esto también se le puede atribuir la obstrucción del sistema de drenaje por residuos sólidos o el diseño inadecuado de la red de alcantarillado pluvial que sea capaz de drenar grandes volúmenes de escorrentías. Entre 2000 al 2006, en un estudio realizado por Arroyo González (2011), se encontró que, en la provincia de San José, se concentró la mayoría de reportes por inundaciones y deslizamientos en el país; estos fueron 914 sucesos, distribuidos en sus diferentes cantones con 401 inundaciones y 540 deslizamientos, de estos, 29 han sido inundaciones en el cantón de San José.

El río Torres se encuentra entre los ríos del Valle Central de la GAM y cada vez está más afectado por el creciente desarrollo urbano con asentamientos de perjudicial respuesta ante deslizamientos e inundaciones (Monge *et al.* 1995). Sin embargo, con respecto a la ocurrencia de inundaciones, también se le puede atribuir factores que afectan el

escurrimiento superficial en toda la microcuenca durante un evento de precipitación. El autor Villón Bejar (2004) menciona que tanto factores meteorológicos como hidrográficos afectan el escurrimiento superficial, por ejemplo, la velocidad y dirección de una tormenta puede causar descargas de caudales mayores, si esta se mueve en dirección de la corriente.

3.5 Escorrentía evitada por la implementación de SbN

Superficies como los cementos y asfaltos disminuyen la capacidad de infiltración y limitan a las coberturas vegetales para interceptar la lluvia (Campos y Vargas 2014). De acuerdo con esto, se ha evidenciado que sí existe una contribución notable por parte de las IV para reducir los excesos de escorrentías sobre superficies impermeables generadas en una microcuenca urbana, favoreciendo el incremento del flujo permeable y flujo base. Evidenciar este tipo de contribuciones se vuelve importante, ya que va de acuerdo con lo que se pretende lograr al contemplar las IV en la planificación urbana para el incremento de las áreas verdes o permeables para el beneficio de toda la sociedad.

El resultado de un estudio realizado por Chen *et al.* (2021), donde utilizaron Modelo de Gestión de Aguas Pluviales por Ordenador (PCSWMM, por sus siglas en inglés) para modelar celdas de biorretención, zanjas de infiltración, techos verdes y cuencas de detención en un barrio del cantón de Heredia, en el área metropolitana de Costa Rica, con un enfoque de escenarios realistas para área urbanas, da a conocer que la generación de escorrentía superficial se reduce comparada a la situación actual. Este resultado va en la misma dirección que esta investigación. Sin embargo, difiere en el área de los escenarios, ya que, en el mismo estudio, se encontró que los techos verdes obtuvieron menos reducciones cuando fueron convertidos en un 25% los edificios en un área total de 23 km² (de un 33,3 a 14,2%). Este resultado en parte es similar con los resultados de los techos verdes de la presente investigación, porque se logra disminuir el volumen de escorrentía, pero se obtuvo que los techos verdes reducen la escorrentía impermeable en mayor cantidad (de un 31 a 5%), cuando un 40% del área fue convertida; esto indica que, para realizar cambios significativos, se debe considerar que el área para implementar con techos verdes debe ser suficiente para tal fin o complementaria con otras alternativas.

En el análisis de diversos estudios realizados sobre el desempeño hidrológico de los pavimentos permeables de los autores Sambito, *et al.* (2021), dan a conocer que, por lo general, la ausencia de un resultado real ha llevado a los autores a subestimar las condiciones o son poco realistas y estos no tienen una correlación entre sí, por lo que los resultados son automáticamente poco confiables. Con base en esto, y de acuerdo con la presente investigación, el modelo realiza las predicciones basándose en la información de la línea base proporcionada (datos meteorológicos y cambios de uso de suelo que se le especifican); por lo tanto, no se interfiere para alterar los eventos de lluvia producidos en el año. Es decir, el modelo utiliza como línea base la precipitación del 2021 para modelar los escenarios futuros y con ello obtener volúmenes de escorrentía.

Puede ser que, si se tomara el 2020 como línea base, la producción de escorrentías hubiera sido diferente, ya que la precipitación y otros aspectos del clima fueron distintos. Además, para cada IV, el modelo empleado en el presente estudio revela cada volumen que forma parte del ciclo hidrológico. No obstante, al igual que Sambito *et al.* (2021), se reconoce la limitación de este tipo de modelaciones con respecto a la reproducibilidad a escala.

En un estudio realizado por Bezerra *et al.* (2022), en el Departamento de Energía Nuclear de la Universidad Federal de Pernambuco, Brazil, en cuanto a la funcionalidad de las zanjas de infiltración, encontraron que existe una contribución alta, al infiltrar gran parte del

volumen drenado proveniente de una superficie impermeable. Este resultado es similar a los resultados de esta investigación, ya que, al contemplar la implementación de zanjas de infiltración, se logra infiltrar gran parte del volumen de agua ocasionando que se reduzca al mínimo el flujo impermeable en relación con el caso base (de 31 a 7%).

Así mismo, los autores Dussaillant *et al.* (2000) determinaron, por medio de un experimento en Madison, Wisconsin, la efectividad de los jardines de lluvia para maximizar la recarga de aguas subterráneas con una superficie entre 10-20% (50-60 m²) de la superficie impermeable utilizando un lisímetro de drenaje, donde en cada volumen de entrada de agua el rebalse fue cero. No obstante, este resultado es un tanto parecido a este estudio, debido a que se ha obtenido que los jardines de lluvia aumentan el flujo base al 33% proveniente de las aguas subterráneas en una superficie de tratamiento de aguas pluviales del 40% (20.01 km²), en relación con el área total de la microcuenca, pero difieren en el método de entrada de agua en la IV.

En el ámbito internacional, se han encontrado resultados similares a los de este proyecto. Un estudio realizado por Liquete *et al.* (2016), en un municipio al norte de Francia, refleja que una IV (un parque acuático) se comporta igual o incluso mejor que la infraestructura gris para la depuración del agua y la protección contra las inundaciones; adicionalmente, se destaca que este tiene un coste similar y proporciona beneficios adicionales. Por otro lado, el estudio realizado por Williams *et al.* (2019) al este de Londres dio a conocer que los residentes de una inmobiliaria en la localidad, al enterarse de que el coste de adquisición era alto porque contaban con un sistema de evacuación de aguas residuales convencionales y al conocer el buen desempeño de las IV para el mismo fin, prefirieron sistemas de origen natural, ya que, además, proporcionan espacios verdes y hábitat para la biodiversidad. Viéndolo desde esta perspectiva, la implementación de las IV en futuras construcciones puede contribuir a reducir este tipo de costos en proyectos de urbanización.

En el resultado de esta modelación, también se ha demostrado que el incremento de la cobertura de árboles no contribuye significativamente a disminuir los volúmenes de escorrentía. Este escenario tuvo un comportamiento de los flujos muy similar al caso base, lo cual quiere decir que se lograría un mejor impacto, si se implementa la combinación con otras alternativas que se adapten mejor a las condiciones del entorno actual (limitada disponibilidad de espacios para restauración o plantaciones). Por ejemplo, no se puede plantar un árbol en los predios de una vivienda, si no se cuenta con espacio suficiente, debido a las implicaciones en su etapa adulta; mientras que, si se instala un techo verde o un jardín de lluvia, se estaría logrando un mejor impacto en los flujos hídricos.

En relación con esto, en un estudio realizado por Birkel *et al.* (2012) sobre los impactos del cambio en la cubierta vegetal en un área de bosque tropical, se encontró que los cambios de la cubierta del suelo que implican la reforestación para la protección natural contra las inundaciones requieren grandes áreas para generar una disminución significativa de los caudales máximos. También, se señala que la vegetación no garantiza la protección natural contra las inundaciones para los periodos de retorno superiores a un año.

En Colombia, los autores Bautista y Peña-Guzmán (2019) dan a conocer resultados con el uso de i-Tree Hydro, y encuentran que los árboles sobre área permeable del 100% son una buena estrategia para la mitigación de los impactos de la urbanización, con el fin de reducir el flujo impermeable en una localidad de 33,28 km² con mayor porcentaje de área urbanizada. En relación con esto, otras pruebas realizadas por Wang *et al.* (2008) en una cuenca urbana Dead Run de Baltimore, Maryland, ilustran que los árboles reducen

significativamente la escorrentía para eventos de precipitación de baja intensidad y corta duración.

Adicionalmente, este resultado puede ser explicado al considerar otros factores como lo expresado por Wang *et al.* (2008), sobre que la capacidad de almacenamiento de los árboles está regulada en parte por la tasa de evaporación potencial que varía en función de los cambios de las condiciones meteorológicas que surgen debido a los efectos de la isla de calor urbana, el cambio climático, la variación de la radiación con la exposición de los árboles y la variación de la velocidad del viento con la altura de los árboles. El cantón de San José es el que presenta valores extremos de temperatura superficial de la tierra de la GAM, con máxima de 51,2 C° y mínima de 33,9 C° (MINAE-SINAC-GIZ-CATIE 2020); este sería uno de los factores que inciden en el desempeño de la vegetación para la absorción del agua.

Por otro lado, el arbolado urbano proporciona beneficios que no necesariamente están relacionados con el manejo de las aguas pluviales. Por ejemplo, un estudio realizado por Benegas *et al.* (2021), en la localidad de Turrialba, Costa Rica, para cuantificar el aporte ecosistémico en el almacenamiento y secuestro de carbono y producción de oxígeno de los árboles, encontró que estos son capaces de proveer dichos servicios ecosistémicos clave de resiliencia en la ciudad y desarrollo sostenible. En tal sentido, los autores Cifuentes-jara *et al.* (2020), bajo el marco del proyecto del Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana, dan a conocer sobre la cantidad de carbono almacenado en el CBIRTRB, donde la vegetación de este aporta un 2,2% del total de *stock* de carbono de la GAM.

En esta misma línea, los autores Bonilla-Duarte *et al.* (2021) señalan que los servicios ecosistémicos del arbolado urbano son aquellos que ayudan a disminuir los desafíos ambientales y socioeconómicos que enfrenta el ser humano, como la contaminación del aire, las islas de calor, escorrentías e inundaciones y contaminación por ruido, lo cual da como resultado el abastecimiento de agua, la formación de los suelos, la regulación del clima, la polinización, etc. A pesar de que se sabe cuáles son los beneficios del arbolado urbano, el crecimiento desordenado de la mancha urbana y su deficiente planeación han impactado en la cantidad y calidad de dichos espacios arborizados (Navarro y Santinelli 2021).

En otro contexto, se ha evidenciado la alta producción de escorrentías superficiales en un incremento descontrolado de urbanización con respecto al caso base (de 31 a 78%). Tal como lo explican varios autores, las consecuencias del reemplazo de la vegetación por superficies impermeables tiene efectos negativos muy altos en los flujos de salida por la reducción de la infiltración (Campos y Vargas 2014) y la evapotranspiración (Sambito, *et al.* 2021), debido a la inestabilidad de los suelos (Bautista y Peña-Guzmán 2019). Esto indica que las áreas potencialmente disponibles para instalar las IV son aquellas ubicadas estratégicamente para tratar de manera concreta el agua proveniente de superficies impermeables para frenar el crecimiento del sistema conectado de red de drenaje, ya que este provoca el incremento de más áreas impermeables, siendo lo idóneo optar por drenajes basados en la naturaleza para el manejo de las aguas pluviales. Dado esto, en los contextos urbanos, en el desarrollo de escenarios de IV se debe considerar las restricciones espaciales existentes (Chen *et al.* 2021).

3.6 Potencial de la viabilidad de implementación futura de SbN

Existe una mayor aprobación para la viabilidad de la implementación de los jardines de lluvia, las celdas de biorretención, los pavimentos permeables y el aumento de la cobertura de árboles por parte de los actores claves de la microcuenca. Los resultados de este estudio favorecen esta percepción, ya que, en las predicciones de la simulación, se obtuvo un resultado muy aceptable para los jardines de lluvia, las celdas de biorretención y los

pavimentos permeables. Sin embargo, el resultado del incremento de área con cobertura de árboles en un 40% no resulta ser gran contribuyente para el manejo de las aguas pluviales, ya que se mantiene con la misma cantidad en la generación de los flujos de escorrentía con respecto al caso base. Este resultado explica que, en las condiciones de la microcuenca donde se concentra la mayor parte de áreas impermeables, ya no hay espacio apto para plantación de árboles; por ende, estos no pueden ejercer la función de disminuir el flujo impermeable, pese a que esta fue una de las alternativas mejor evaluadas por los actores, no se debería orientar los esfuerzos en esta práctica.

Si bien es cierto, hay un importante porcentaje de área de cobertura de árboles y de suelos permeables en la microcuenca; en su mayoría, estos se encuentran en la parte alta de la microcuenca; los que probablemente son áreas privadas y cumplen muy bien su función de disminuir las escorrentías únicamente en esa zona. Por su parte, Pérez Rubi y Hack (2021) señalan que, posteriormente, estas zonas se van a convertir en viviendas, y que la implementación de las IV se ve limitada al área pública con superficies sin sellar. A esto también se le suma que tanto en Costa Rica como en otros países de América Latina, comúnmente, hay sectores de la población con recursos económicos escasos y sin acceso a créditos bancarios para obtener una vivienda con una ubicación segura o formal. Sin duda, estos sectores no tienen más alternativa que adquirir lotes en sitios vulnerables, por lo general, no aptos para vivir (Fernández Arce *et al.* 2018); esto es lo que probablemente llegará a suceder en la parte alta de la microcuenca.

Por otro lado, Ariza *et al.* (2019) encontraron que las celdas de biorretención y las zanjas de infiltración se encuentran entre los tipos de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) más adecuados para las áreas públicas y los techos verdes, entre los más adecuados para áreas privadas como residencias y edificios en Bogotá, Colombia. Esto debería entrar en un marco regulatorio para la propiedad privada, con el fin de que se les exija que incorporen una alternativa que contribuya a mitigar el impacto de su vivienda o empresa. Así, la FAO (2018) señala que existe una tendencia muy marcada que llegará a reconocer a los actores de la sociedad civil como entes trascendentales para el análisis de políticas que promuevan los potenciales beneficios de la silvicultura urbana. Estos también pueden llegar a ser accionistas importantes para la creación de directrices legislativas que promuevan la integración de las SbN y una mejor gobernanza en la ciudad.

Entre estas indagaciones, se halló el estudio de los autores Pérez Rubi y Hack (2021) que proponen una metodología adaptativa para el diseño de SbN como un sistema disgregado para las escorrentías urbanas y se encontró que la razón que obstaculiza las infraestructuras de SbN son los mismos habitantes locales; pero que, a su vez, involucrarlos en procesos de monitoreo y evaluación es sumamente importante para superar las incertidumbres que existen en torno a las SbN. Sin embargo, se encontró en el Plan de Gestión Quinquenal del CBIRTRB que el CL se caracteriza por tener un desempeño fuerte en lo relacionado con la gestión social (CBIRT-RB 2020). Esto se ha evidenciado a través de la labor que han venido ejerciendo, en el que juegan un rol importante para el involucramiento multisectorial en los procesos de sostenibilidad urbana.

No obstante, el estudio realizado por Fluhrer *et al.* (2021), que propone una metodología para evaluar el potencial de implementación de IV como caso de estudio en la región metropolitana de San José, Costa Rica, concluye que se necesitan más análisis específicos del sitio para revelar aspectos sociales y técnicos relevantes; pero que sí existe un potencial a diferentes dimensiones para mejorar las condiciones hidrológicas, ecológicas y sociales de los habitantes de dicha región. Desconocer estos aspectos podría limitar la aceptación y la sostenibilidad de las infraestructuras de las SbN (Pérez Rubi y Hack 2021). En tal sentido,

en la Estrategia Ríos Limpios para la recuperación de las cuencas urbanas, se encontró que tiene como objetivo impulsar la creación de una cultura en torno al agua mediante la participación social y la formación de alianzas estratégicas para contribuir en el mejoramiento de los ecosistemas y la calidad de vida de las personas alrededor de las cuencas urbanas (Castillo Rodríguez y Sáez Peña 2020).

Los sectores económico y político también juegan un papel importante para favorecer la viabilidad de la implementación de SbN, esto se lograría si hay una voluntad política y la colaboración de las partes interesadas (MINAE-SINAC-GIZ 2021). En esta línea, se conoce que la incorporación de los servicios ecosistémicos en la planificación urbana es baja en América Latina y el Caribe; pero, al mismo tiempo, se encuentra en un desarrollo prometedor relacionado con la aplicación de acciones innovadoras como las SbN y en apoyo a la nueva agenda urbana global (Romero-Duque *et al.* 2020). Sin embargo, la alta influencia económica para maximizar las oportunidades de desarrollo significa que no siempre se van a priorizar estos beneficios obtenidos de los diseños de infraestructura verde (Williams *et al.* 2019). Este es un desafío que se debe abordar, principalmente, dando a conocer de manera participativa qué sucede con la hidrología urbana cuando se alteran las condiciones naturales de la microcuenca. En la agenda de las Naciones Unidas y los ODS, específicamente el ODS 11, se resalta la importancia de impulsar los espacios verdes para mejorar la calidad de vida en las urbes y los países están comprometidos a propiciar estos espacios y que sean seguros, inclusivos y accesibles (FAO 2018).

Por otro lado, el aspecto del financiamiento fue una de las limitantes muy mencionadas por el CL de la microcuenca. No obstante, un estudio reciente realizado por Alvarado Vega (2022) determina que el Fondo Ciudad Verde es un mecanismo de financiamiento de SbN que ha aportado el capital semilla para la difusión de dichas acciones y su aplicación en las ciudades concentradas en los corredores biológicos de la zona y que también los resultados de este fondo no serían posibles sin las alianzas multisectoriales. Esto resulta muy positivo, pero la implementación no debe limitarse a los límites de corredor biológico o microcuenca, ni mucho menos a sitios con nivel de desarrollo alto; si no que, en la toma de decisiones, debe contemplarse como una oportunidad para que los sectores sociales con menor beneficio sean candidatos a la redistribución de los ingresos que les permita mejorar su desarrollo social (MIDEPLAN 2018). En este sentido, la evaluación de IV realizada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) muestra que las IV tienen un menor costo que las alternativas tradicionales y que es necesario insistir para buscar la rentabilidad tanto de la inversión como de la equidad en la distribución de beneficios (Borja 2021).

En un informe realizado por el Banco Mundial, se ha encontrado que el costo de implementación de IV como jardines de lluvia varía en función del diseño; se estima que el costo de utilizarlos es entre un 70% y un 80% menor que la infraestructura de drenaje tradicional, esto hace que los beneficios superen significativamente los costos. Para el caso de los techos verdes, los costos de inversión pueden rondar entre los US\$150/m², aunque estos costos varían enormemente en función de las condiciones locales y normativas del país. Así mismo, la estimación realizada del costo anual de la plantación de árboles se encuentra entre US\$15 y US\$65 por árbol, con beneficios netos que varían entre los US\$30 y US\$90 por árbol anualmente (Borja 2021).

Según la Ley N.º 4240 de la Planificación Urbana del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo de Costa Rica (INVU), se crea el Plan Nacional de Desarrollo Urbano como instrumento de planificación para el desarrollo eficiente de las áreas urbanas, con el objetivo de mejorar el uso de los recursos naturales y humanos (INVU 1968). Por su parte, el Plan Regulador Metropolitano 2013–2030 busca propiciar un ordenamiento urbano adecuado

para mejorar la calidad de vida de la población, que genere un desarrollo económico competitivo en los núcleos urbanos y que, además, pretenda generar un énfasis en el equilibrio del entorno natural, agroproductivo y urbanístico (INVU 2013). El Plan regulador se constituye como la principal herramienta para incidir en el territorio en Costa Rica (Avendaño-Leadem *et al.* 2020). Debido a que la evolución del urbanismo exige claramente una disciplina de legislación que se responsabilice por un análisis eficaz para establecer modelos de intervención bajo pautas sistemáticas con una visión amplia de ciudad (Ornés 2009).

En Costa Rica, existe un amplio marco normativo en el contexto de las SbN, el que se encuentra detallado en la Guía de Soluciones Basadas en la Naturaleza creada por el proyecto Biodiver_City, y está orientado a tomadores de decisiones del sector político y económico en el contexto urbano de la GAM (MINAE-SINAC-GIZ 2021). Consecuentemente, este compendio del marco legal relacionado con las SbN da una visión muy amplia de que, para la viabilidad de la implementación de SbN en Costa Rica, existe un panorama bastante sólido. En este sentido, el autor Magdaleno *et al.* (2018) señala que la base de una elevada viabilidad técnica y socioeconómica, específicamente de IV, genera la capacidad de aportar soluciones a diversos problemas ofreciendo un amplio rango de beneficios, por lo que se convierten en una herramienta esencial.

5. CONCLUSIONES

En las condiciones de esta investigación, se concluye lo siguiente:

- Se obtuvieron los datos necesarios con un importante nivel de detalle que permitió disminuir la complejidad en la investigación, para generar un comportamiento de balance hídrico representativo que considera las infraestructuras verdes y grises en la microcuenca ante eventos de precipitación.
- El modelo i-Tree Hydro Plus es capaz de representar las características hídricas de la zona y, con base en ellas, se puede evidenciar el efecto que se genera sobre el servicio ecosistémico hídrico con la implementación de SbN en un contexto urbano.
- La cuantificación de los efectos hídricos que podría tener la implementación de SbN va más allá de los modelos hidrológicos, junto con el análisis de la viabilidad social (sustento legal, normativo, percepción de actores locales), se contribuye con la promoción de la implementación de las SbN para la atenuación de los riesgos por inundaciones.
- El aumento de cobertura de árboles como alternativa para mitigar problemas de aguas pluviales no es una alternativa eficaz para tal fin, ya que se ha evidenciado que el aporte es casi nulo, debido a que el área disponible es reducida. Por ello, las acciones se deben orientar a la combinación con prácticas más innovadoras y las SbN ofrecen un amplio panorama de estas alternativas.
- Se reconoce al CL como el mecanismo o plataforma de gobernanza clave para la toma de decisiones en la microcuenca.
- Considerando todos los aspectos de orden social y legal encontrados en esta investigación, se determina que sí existe una viabilidad de la implementación de las SbN y que está determinada por la necesidad de implementar infraestructuras verdes para proporcionar servicios ecosistémicos en los entornos urbanos ante una tendencia de crecimiento urbanístico.

6. RECOMENDACIONES

Sobre la modelación hidrológica:

- Se sugiere que el modelo i-Tree Hydro Plus integre de manera paralela a la modelación, la cuantificación de los costos económicos que implican la implementación de las diferentes IV por unidad de áreas, esto con el fin de mejorar la eficiencia de la puesta en práctica.
- Se recomienda que el modelo i-Tree Hydro Plus cuente con un proceso estadístico adicional a los caudales observados, para que sirva como herramienta de calibración, esto debido a que, para la región, se cuenta con escasa generación de datos sobre los caudales observados.
- Se recomienda disminuir, en la medida de lo posible, la dependencia de las infraestructuras grises para el manejo de las aguas pluviales, debido a que la impermeabilización con sistemas de redes de drenaje agrava aún más las consecuencias por ser también superficies impermeables.

Sobre la viabilidad de la implementación:

- Para optar a un mejor financiamiento con la cooperación internacional, se recomienda identificar áreas de drenaje prioritarias que se requieren atender de manera urgente, tomando en cuenta los planes de ordenación urbana y no tanto inclinarse por un indicador alto de IDS.
- Se debe considerar un porcentaje de la inversión para procesos de capacitación, aprendizaje y experimentación sobre las implicaciones que conlleva la inserción de las SbN en los entornos urbanos.
- Investigaciones con enfoque social requieren de más tiempo para obtener más y mejores resultados participativos, con el único objetivo de que los actores se apropien realmente de esta labor para incentivar el interés por proveer servicios ambientales comunes en los medios urbanos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aboelnour, M; Gitau, MW; Engel, BA. 2019. Hydrologic response in an urban watershed as affected by climate and land-use change. *Water (Switzerland)* 11(8):1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11081603>.
- Abdi, R. 2019. COMPUTER ALGORITHMS TO SIMULATE NATURE-BASED RESTORATION OF URBAN RIVER AND STORMWATER SYSTEMS. (July).
- Agencia de Protección Ambiental (EPA). 2012. Stormwater Best Management Practice: Infiltration Trench. C.3 Stormwater Technical Guidance (December):88-91.
- _____. s.f. What is Green Infrastructure? (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure#raingardens>.
- Agredo Cardona, GA. 2013. LA CUENCA URBANA COMO UNIDAD TERRITORIAL PARA LA PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO SOSTENIBLE EN CIUDADES DE MEDIA MONTAÑA DEL TRÓPICO ANDINO. s.l., s.e. 177 p.
- Alvarado-García, V; Zúñiga-Amador, MA. 2018. Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica. *La Calera* 18(30):39-47. DOI: <https://doi.org/10.5377/calera.v18i30.7738>.
- Alvarado - García, V; Pérez Gómez, G; Gastezzi Arias, P. 2020. Calidad del ecosistema urbano río Torres, San José Costa Rica: factores bióticos y abióticos. *UNED Research Journal* 12(2):e3016. DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v12i2.3016>.
- Alvarado Vega, V. 2022. El Fondo y Crédito Ciudad Verde: Mecanismos efectivos para financiar soluciones basadas en la naturaleza (SbN). *Ambientico* :19-27.
- Arias Ramírez, R; Sánchez Hernández, L. 2012. Patrones de localización, concentración y evolución del empleo industrial en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica. *Ciencias Económicas* 30(2):131-154.
- Ariza, SLJ; Martínez, JA; Muñoz, AF; Quijano, JP; Rodríguez, JP; Camacho, LA; Díaz-Granados, M. 2019. A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability (Switzerland)* 11(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11082312>.
- Arroyo González, LN. 2011. COSTA RICA: ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA ESPACIAL DE INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS POR PROVINCIAS Y CANTONES, AÑOS 2000 - 2006.
- Avendaño-Leadem, D; Cedeño-Montoya, B; Arroyo-Zeledón, MS. 2020. Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central* 2(65):63-90. DOI: <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.3>.
- Banco Mundial. s. f. Gestión Integral de Aguas Urbanas: Síntesis. .
- Bautista, D; Peña-Guzmán, C. 2019. Simulating the hydrological impact of green roof use and an increase in green areas in an urban catchment with i-tree: A case study with the town of Fontibón in Bogotá, Colombia. *Resources* 8(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/resources8020068>.
- Benegas, L; Rojas, A; Iraheta, A; Cárdenas, J. 2021. Análisis del componente arbóreo y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad de Turrialba, Costa Rica (en línea). *Ecosistemas* 30(2):1-10. Disponible en <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/2083>.
- Beven, K. 2012. Rainfall-Runoff Modelling. s.l., s.e. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119951001>.
- Beven, KJ; Kirkby, MJ. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1):43-69. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- Bezerra, PHL; Coutinho, AP; Lassabatere, L; Neto, SMDS; de Melo, TDAT; Antonino,

- ACD; Angulo-Jaramillo, R; Montenegro, SMGL. 2022. Water Dynamics in an Infiltration Trench in an Urban Centre in Brazil: Monitoring and Modelling. *Water (Switzerland)* 14(4):1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14040513>.
- Birkel, C; Barahona, AC. 2019. Rainfall-Runoff Modeling: A Brief Overview (en línea). 2 ed. s.l., Elsevier Inc. 1-9 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11595-7>.
- Birkel, C; Soulsby, C; Tetzlaff, D. 2012. Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment. *Hydrological Sciences Journal* 57(8):1543-1561. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.728707>.
- Bonilla-Duarte, S; Díaz, G; Cortés, L; Jáuregui-Haza, U. 2021. “El arbolado en ciudades y la protección de los recursos hídricos: preguntas y respuestas”. s.l., s.e., vol.4. 35-37 p. DOI: <https://doi.org/10.22206/cac.2021.v4i2.pp35-37>.
- Borja, L. 2021. Infraestructura Verde Urbana II: Implementación y seguimiento de soluciones (en línea). Disponible en <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Infraestructura-Verde-Urbana-II-Implementacion-y-seguimiento-de-soluciones.pdf>.
- Campos, RM; Vargas, PH. 2014. Incremento de áreas impermeables por cambios de usos de la tierra en la microcuenca del Río Burío. *Reflexiones* 93(1):33-46.
- Castillo Rodríguez, G; Sáez Peña, E. 2020. Estrategia Nacional para la Recuperación de Cuencas Urbanas 2020-2030 (en línea). *Ríos Limpios* :44. Disponible en https://www.undp.org/content/dam/costa_rica/docs/undp_cr_Estrategia_Nacional_Rios_Limpios_2020.pdf.
- CBIRT-RB. 2020. Corredor Biológico Interurbano Río Torres Reserva de la Biosfera: PLAN DE GESTIÓN 2021-2025.
- CENIGA. 2020. Descripción del Sistema de Clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra (en línea). *Ambienticos* (273):23-34. Disponible en http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/art/ambientico/273_23-34.pdf.
- Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA). 2018. Sistema de clasificación del uso y la cobertura de la tierra para Costa Rica. Versión 1.2. (en línea). :64. Disponible en <http://www.sinac.go.cr/ceniga/?q=content/sistema-de-monitoreo-de-la-cobertura-y-uso-de-la-tierra-y-ecosistemas-simocute>.
- Chen, V; Bonilla Brenes, JR; Chapa, F; Hack, J. 2021. Development and modelling of realistic retrofitted Nature-based Solution scenarios to reduce flood occurrence at the catchment scale (en línea). *Ambio* 50(8):1462-1476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01493-8>.
- Chinchilla, M; Mata, R; Alvarado, A. 2011. Andisoles, inceptisoles y entisoles de la subcuenca del río Pirrís, región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35(1):83-107. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v35i1.6688>.
- Cifuentes-jara, M; Brenes, R; Brenes, C; Corrales, L; Vargas, M; Betbeder, J; Metropolitana, GÁ. 2020. CLOS ÁRBOLES EN LA CIUDAD: CARBONO COMO SERVICIO ECOSISTÉMICO URBANO.
- Cohen-Shacham, E; Walters, G; Janzen, C; Maginnis, S. 2016. Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN. xiii + 97pp. s.l., s.e. 97 p.
- Comisión Europea. 2013. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS.
- CONAMA. 2018. Soluciones basadas en la naturaleza (en línea). Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018. Disponible en <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F>

- www.conama.org/conama/download/files/conama2018/FGTs%25202018%2F10_final.pdf&clen=3934212&chunk=true.
- Cooper, M. 2010. Advanced Bash-Scripting Guide An in-depth exploration of the art of shell scripting Table of Contents (en línea). Okt 2005 Abrufbar über <http://www.tldp.org/LDP/absabsguide.pdf> Zugriff 11/12/2005 22:74 (November 2008):2267-2274. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp>.
- Corrales Chaves, L. 2020. Desarrollo del Concepto de Ciudad Verde.
- Dussaillant, AR; Católica, PU; Wisconsin-madison, CHWU; Kenneth, W; Wisconsin-madison, PU. 2000. Infiltration of Stormwater in a Rain Garden: Richards Equation Numerical Model and Field Experiment (en línea). Soil Science (Richards 1931):156. Disponible en <http://www.iemss.org/iemss2004/pdf/hydroresponses/dussinfi.pdf>.
- Eggermont, H; Balian, E; Azevedo, JMN; Beumer, V; Brodin, T; Claudet, J; Fady, B; Grube, M; Keune, H; Lamarque, P; Reuter, K; Smith, M; Van Ham, C; Weisser, WW; Le Roux, X. 2015. Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe (en línea). Gaia 24(4):243-248. DOI: <https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9>.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2021. Stormwater Best Management Practice Bioretention (Rain Gardens) (en línea). Office of Water (December). Disponible en <https://www.epa.gov/npdes>.
- _____. s. f. What is Green Infrastructure? | Green Infrastructure | US EPA. s.l., s.e.
- Fallas Cordero, N. 2015. Mapas De Susceptibilidad Al Deslizamiento En Las Microcuencas De Los Ríos Torres y Tibás, Costa Rica (en línea). s.l., s.e. 78 p. Disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6354?locale-attribute=en>.
- FAO. 1998. Chapter 4 - Determination of ETo (en línea). s.l., s.e. Disponible en [https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e08.htm#pan evaporation method](https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e08.htm#pan%20evaporation%20method).
- FAO, O de las NU para la A y la A. 2018. Foro Mundial sobre Bosques Urbanos. s.l., s.e., vol.69. 1-88 p.
- Feoli, S. 2013. Corredor Biológico Interurbano del Río Torres y corredores biológicos en general. Ambientico 232-233:51-55.
- Fernández Arce, M; Méndez Ocampo, I; Muñoz Jiménez, R. 2018. Exposición a inundaciones en Moravia, San José, Costa Rica. Revista Reflexiones 98(1):7-21. DOI: <https://doi.org/10.15517/rr.v98i1.32492>.
- Fernández Brenes, María Beatriz; Sánchez Sibaja, G. 2019. Experiencia y buenas prácticas en el Corredor Biológico Interurbano Río Torres Reserva de la Biosfera (en línea). 7(1):54-59. Disponible en https://www.bertelsmannstiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf [http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%20society and inequalities%20series%29.pdf](http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%20society%20and%20inequalities%20series%29.pdf) <https://www.quora.com/What-is-the>.
- Fluhrer, T; Chapa, F; Hack, J. 2021. A methodology for assessing the implementation potential for retrofitted and multifunctional urban green infrastructure in public areas of the global south. Sustainability (Switzerland) 13(1):1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010384>.
- Foster, J; Lowe, A; Winkelman, S. 2011. the Value of Green Infrastructure for Urban Climate Adaptation (en línea). (February). Disponible en http://dev.cakex.org/sites/default/files/Green_Infrastructure_FINAL.pdf.
- GIZ. 2022. Corredor Biológico Interurbano Río Torres Reserva de la Biosfera (en línea, sitio web). Consultado 21 sep. 2022. Disponible en <http://biocorredores.org/biodiver-city-sanjose/corredores-biologicos/corredor-biologico-interurbano-rio-torres-reserva-de-la-biosfera>.
- Gómez-Reyes, E. 2014. Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica (en línea). s.l., s.e. Disponible en <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F>

- %2Frde.inegi.org.mx%2FRDE_10%2FDoctos%2FRDE_10_opt.pdf&cflen=1878152&chunk=true.
- Grau, HR; Hernández, ME; Gutiérrez, J; Gasparri, NI; Casavecchia, MC; Flores-Ivaldi, EE; Paolini, L. 2008. A peri-urban neotropical forest transition and its consequences for environmental services. *Ecology and Society* 13(1). DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-02434-130135>.
- GSSHA. 2008. User's Manual - Infiltration:Green and Ampt (GA) (en línea). s.l., s.e. Disponible en [https://www.gsshawiki.com/Infiltration:Green_and_Ampt_\(GA\)](https://www.gsshawiki.com/Infiltration:Green_and_Ampt_(GA)).
- Guerrero, E; De Keizer, O; Córdoba, R. 2006. La Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos (en línea). UICN :78. Disponible en www.iucn.org/mesoamerica.
- Hall R, F. 1968. Base-Flow Recessions-A Review. *Water Resources Research* 4:973-983.
- Hirabayashi, S; Endreny, TA. 2016. Surface and Upper Weather Pre-processor for i-Tree Eco and Hydro Introduction Surface weather data contain measurements at a single weather station for a year in the and afternoon at a single site for a year in the FSL format . Both can be downloaded from. 1.2:1-19.
- Holdridge, LR. 1982. Ecología basada en zonas de vida (en línea). s.l., s.e., vol.53. 1689-1699 p. Disponible en <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf>.
- i-Tree. 2019. Hydro User's Manual (en línea). V6.3 beta. Disponible en chrome-extension://efaidnbmnmbpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.itreetools.org%2Fdocuments%2F242%2FHydro_Manual_v6_eskH3aW.pdf&cflen=1250428.
- _____. 2022. HydroPlus Technical Manual. .
- Inostroza Luis, Garay Sarasti Henry, APG. 2020. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS URBANOS EN LATINOAMÉRICA: OPORTUNIDADES PARA EL DESARROLLO URBANO SOSTENIBLE, LA ACCIÓN CLIMÁTICA Y LA GESTIÓN DE LA BIODIVERSIDAD URBANA. *CODS* 57(1):1-17.
- Instituto Meteorológico Nacional. 2017. El Clima y las Regiones Climáticas de Costa Rica (en línea). Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica . Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2013. Estimaciones y Proyecciones de Población por sexo y edad, 1950-2050 (en línea). s.l., s.e. 1-97 p. Disponible en https://ccp.ucr.ac.cr/observa/CRnacional/pdf/Metodologia_estimaciones_y_proyecciones_resumida.pdf.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo - INVU. 1968. Ley N° 4240 Planificación Urbana. Costa Rica, s.e. p. 40.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU). 2013. Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) - Plan GAM 2013-2030 (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.invu.go.cr/plan-gam-13-30>.
- Jullian, C; Nahuelhual, L; Mazzorana, B; Aguayo, M. 2018. Assessment of the ecosystem service of water regulation under scenarios of conservation of native vegetation and expansion of forest plantations in south-central Chile. *Bosque* 39(2):277-289. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>.
- Kupriyanov, W. 2009. URBAN HYDROLOGY (en línea). *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)-UNESCO*. s.l., s.e. Disponible en <chrome-extension://efaidnbmnmbpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww.eolss.net%2Fsample-chapters%2Fc07%2Fe2-02-06-05.pdf&cflen=224238&chunk=true>.
- Lawrence, MG. 2005. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the*

- American Meteorological Society 86(2):225-233. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>.
- Liquete, C; Udias, A; Conte, G; Grizzetti, B; Masi, F. 2016. Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits (en línea). *Ecosystem Services* 22(December 2015):392-401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.011>.
- Magdaleno, F. 2017. De la infraestructura gris a la verde. s.l., s.e. p. 1-525.
- Magdaleno, F; Cortés Sánchez, FM; Martín, BM. 2018. Infraestructuras verdes y azules: estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático (en línea). *Revista Digital Del Cedex* (191):105-112. Disponible en <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2350>.
- Maidment, D. 1996. *Handbook of Hydrology*.pdf. s.l., s.e. p. 824.
- MINAE-SINAC-GIZ-CATIE. 2020. Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana (en línea). Disponible en <https://sites.google.com/view/atlas-v1-1/inicio>.
- MINAE-SINAC-GIZ. 2021. Guía de Soluciones Basadas en la Naturaleza. San José, Costa Rica, s.e.
- MINAE - GIZ. 2020. Gran Áreas Metropolitana: Atlas de servicios ecosistémicos.
- MINAET – Ministerio de Salud. 2011. Guía para la elaboración de Programas de Gestión Ambiental Institucional (PGAI) en el sector público de Costa Rica. San José, Costa Rica, s.e.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). 2018. Índice de Desarrollo Social 2017. s.l., s.e. 1-128 p.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). 2017. Índice de Desarrollo Social (IDS) (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.mideplan.go.cr/indice-desarrollo-social>.
- _____. 2018. MIDEPLAN presenta V informe sobre el Índice de Desarrollo Social para distritos y cantones del país _ Ministerio de Planificación Nacional y Política. s.l., s.e.
- MIVAH. 2016. Dimensión ambiental (en línea). (July):1-23. Disponible en https://www.mivah.go.cr/Documentos/PlanGAM2013/01-DIMENSIONES/Dimension_Ambiental.pdf.
- Monge, G; Esquivel, L; Campos, N; Méndez, L; Sánchez, H; Rodríguez, M; Morales, L. 1995. Deslizamientos, inundaciones, sismos. Litografía e Imprenta Universal, S.A. :32.
- MOPT-MINAE-MVAH. 2020. DECRETO EJECUTIVO N° 42465- MOPT-MINAE-MIVAH.
- Navarro Miranda, L; SantineLLi Ramos, MÁ. 2021. Responsabilidad social y sostenibilidad: Disrupción e innovación ante el cambio de época (en línea). s.l., s.e. 1-884 p. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Jimenez-25/publication/359505864_WEB_Responsabilidad_social_y_sostenibilidad/links/624120ef8068956f3c5397b2/WEB-Responsabilidad-social-y-sostenibilidad.pdf#page=583.
- Ochoa, TB; Cuadros, AJ; Arapa, Guzmán, E; Ochoa, TE; Bonnesoeur, V. 2022. Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural (en línea). Disponible en <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/01/Guia-de-Modelacion-Hidrologica-para-la-IN-2.pdf>.
- ONU-WWAP. 2018. Informe Mundial De Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo De Los Recursos Hídricos: Soluciones Basadas En La Naturaleza Para La Gestión Del Agua (en línea). s.l., s.e. 168 p. Disponible en <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>.
- ONU. 2015. Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles (en línea). Sustainable

- development goals :1-2. Disponible en <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>.
- Ornés, S. 2009. El urbanismo, la planificación urbana y el ordenamiento territorial desde la perspectiva del derecho urbanístico venezolano. *Politeia* 32(42):197-225.
- OTT Hydromet. 2015. OTT MF pro: Manual Básico del Usuario. Kempten, Germany, s.e. p. 26.
- Pennington, H; Angulo, Y. 2019. Aportes de la Universidad de Costa Rica para el alcance de los objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. s.l., s.e.
- Pérez Rubi, M; Hack, J. 2021. Co-design of experimental nature-based solutions for decentralized dry-weather runoff treatment retrofitted in a densely urbanized area in Central America. *Ambio* 50(8):1498-1513. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01457-y>.
- Potthast, M; Geppert, S. 2019. Corredores Biológicos Interurbanos: Fusionando el capital construido y el capital natural de la ciudad (en línea). :5-12. Disponible en www.ambientico.una.ac.cr.
- Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible ProDUS-UCR. 2020. Actualización del Plan Regulador del cantón Goicoechea: Etapa Diagnóstico | Eje social.
- Pujol Mesalles, R; Sánchez Hernández, L; Pérez Molina, E. 2011. Patrones de crecimiento y concentración de actividades urbanas en la gran área metropolitana de Costa Rica, 1993-2010. *Revista Reflexiones* 0(0):191-209. DOI: <https://doi.org/10.15517/rr.v0i0.1533>.
- Quesada-Román, Adolfo; Castro-Chacón, Jose Pablo; Boraschi, SF. 2021. No Title Geomorphology, land use, and environmental impacts in a densely populated urban catchment of Costa Rica (en línea). *Journal of South American Earth Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103560>.
- Quesada-Román, A; Villalobos-Portilla, E; Campos-Durán, D. 2020. Hydrometeorological disasters in urban areas of Costa Rica, Central America. *Environmental Hazards* :1-15. DOI: <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1791034>.
- Research, B. 2017. Urbanization in Latin America. *BBVA Research* (July):21.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, Fernando Gonzalez, Laura Alicia Tablada, EM; Díaz, MDP; Robledo, CW; Balzarini, MG. 2008. Estadísticas para las Ciencias Agropecuarias (en línea). :329. Disponible en <http://books.google.com.ec/books?id=huIRHgNpqqkC>.
- Rivero, G; Karla, J; Lugo, A; América, L; Ortiz, R; Rincón, JC. 2020. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DEL MODELO SWMM Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO. *Revista Gaceta Técnica* 21(1):44-64.
- Rodríguez Castillo, G; Sáez Peña, E. 2020. Estrategia nacional para la recuperación de cuencas urbanas 2020-2030. :44.
- Roesner, LA. 2009. Storm Water Management Model Manual (en línea). *Usepa* (July):37-46. Disponible en https://data.aquacloud.net/public/2018/hla-hydrolatinamerica/olivgon5/public/Data/epaswmm5_user_manual.pdf.
- Romero-Duque, LP; Trilleras, JM; 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138780>.
- Rueda, S. 2010. Ámbito 06. Espacios verdes y biodiversidad urbana Objetivo: aumento de la biodiversidad urbana (en línea). Plan de indicadores de sostenibilidad urbana de Victoria-Gasteiz :209-252. Disponible en <http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/es/89/14/38914.pdf>.
- Salgado, D. 2009. Inundaciones y gestión del riesgo de desastres. Retos para su reducción y

- mitigación (en línea). *Ambientico* :7-11. Disponible en www.ambientico.org.
- Sambito, Mariacrosetta; Severino, Alessandro; Freni, Gabriele; Nedhuza, L. 2021. A Systematic Review of the Hydrological, Environmental and Durability Performance of Permeable Pavement Systems. *Sustainability*. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13084509>.
- Sánchez Hernández, L. 2018. Tendencias y patrones del crecimiento urbano en la GAM, implicaciones sociales, económicas y ambientales y desafíos desde el Ordenamiento territorial. :74.
- Sánchez Hernández, L. 2018. INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE 2018 Tendencias y patrones del crecimiento urbano en la GAM, implicaciones sociales, económicas y ambientales y desafíos desde el Ordenamiento territorial (en línea). *Estado de la nación* :38. Disponible en <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/2982>.
- Sánchez Rodríguez, R. 2013. Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina (en línea). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) :160. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36622/S2013813_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Sokac, M. 2019. Water Balance in Urban Areas (en línea). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 471(4). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/4/042028>.
- Trujillo-Acosta, A; Peraza-Estrella, MJ; Marina-Hipólito, JG; Boraschi, SF. 2016. Evaluación del Corredor Interurbano Río Torres, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 14(34):53. DOI: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i34.3001>.
- Uhlenbrook, S; Seibert, J; Leibundgut, C; Rodhe, A. 1999. Incertitude de prévision d'un modèle conceptuel pluie-débit due à l'identification des paramètres et de la structure du modèle. *Hydrological Sciences Journal* 44(5):779-797. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626669909492273>.
- UICN. 2016. Programa de la UICN 2017-2020. *Congreso Mundial de la Naturaleza* :57 pp.
- _____. 2017. ¿Qué son las Soluciones Basadas en la Naturaleza? (en línea, sitio web). Consultado 31 oct. 2021. Disponible en <https://www.iucn.org/node/28778>.
- Valle-Hidalgo, D. 2021. Avifauna del Corredor Biológico Interurbano Río Torres Reserva de la Biosfera: estrategia basada en la naturaleza para traer la calidad del bosque a la ciudad. *Ambientico* :33-41.
- Valverde, JPB; Blank, C; Roidt, M; Schneider, L; Stefan, C. 2016. Application of a GIS multi-criteria decision analysis for the identification of intrinsic suitable sites in Costa Rica for the application of Managed Aquifer Recharge (MAR) through spreading methods. *Water (Switzerland)* 8(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/w8090391>.
- Villón Bejar, M. 2004. *Hidrología*. 1 ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica (ed.). s.l., s.e. 471 p. DOI: <https://doi.org/ISBN 978-9977-66-159-9>.
- Walker, WW. 1990. P8 Urban Catchment Model Program Documentation. s.l., IEP, Inc.
- Wang, J; Endreny, TA; Hassett, JM. 2005. A flexible modeling package for topographically based watershed hydrology. *Journal of Hydrology* 314(1-4):78-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.030>.
- Wang, J; Endreny, TA; Nowak, DJ. 2008. Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model. *Journal of the American Water Resources Association* 44(1):75-85. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00139.x>.
- Wang, J; Hassett, JM; Endreny, TA. 2005. An object oriented approach to the description and simulation of watershed scale hydrologic processes. *Computers and Geosciences* 31(4):425-435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.025>.
- Wild, TC; Jefferies, C; D'Arcy, BJ. 2002. SUDS in Scotland: the Scottish SUDS database (en línea). *Sniffer* (February):33. DOI:

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30411.44324>.

- Williams, JB; Jose, R; Moobela, C; Hutchinson, DJ; Wise, R; Gaterell, M. 2019. Residents' perceptions of sustainable drainage systems as highly functional blue green infrastructure (en línea). *Landscape and Urban Planning* 190(November 2018):103610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103610>.
- Wong, THF; Fletcher, TD; Duncan, HP; Coleman, JR; Jenkins, GA. 2002. A Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation. *Global Solutions for Urban Drainage* :1-14. DOI: [https://doi.org/10.1061/40644\(2002\)115](https://doi.org/10.1061/40644(2002)115).
- Yang, Y; Endreny, TA; Nowak, DJ. 2011. iTree-Hydro: Snow hydrology update for the urban forest hydrology model. *Journal of the American Water Resources Association* 47(6):1211-1218. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00564.x>.

8. ANEXOS

Trabajo de campo

Anexo 1. Giras de reconocimiento del sitio de estudio, encuentros con los actores claves y aforado del río

Figura 26. Vista desde la parte alta de la microcuenca, localidad de Rancho Redondo, Goicoechea.



Figura 27. Pasturas localizadas en la parte alta de la microcuenca, localidad de Rancho Redondo, Goicoechea.



Figura 28. Desembocadura de la microcuenca, parte baja de la microcuenca localizada en la planta hidroeléctrica Belén.



Figura 29. Sitio de aforado del río Torres, localizado en el sector “Los Conejos” en el vecindario de Rohrmoser.



Figura 30. Representación de cause principal desde la parte alta media y media baja de la microcuenca río Torres y punto de aforo.



Figura 31. Área recreativa ubicada en el margen del río Torres, localidad de Salitrillos.



Figura 382. Huerta urbana comunal ubicada en el sector de Salitrillos a un costado del cauce principal.



Figura 33. Infraestructura verde de tipo biojardinera para el tratamiento de aguas residuales del edificio Órganos de Desconcentración Máxima del Banco Central.

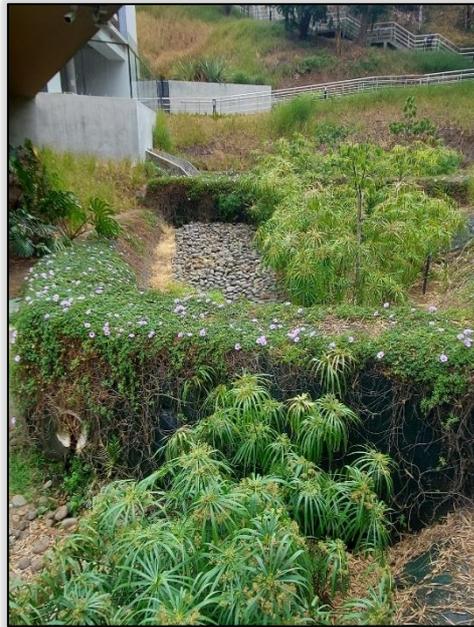


Figura 34. Montaje del equipo OTT MF pro para la medición del caudal del río.



Figura 35. Reunión con los actores del CL para presentar la propuesta de investigación y aplicación de encuestas.



Figura 36. Giras de reconocimiento de la microcuenca del río Torres.



Anexo 2. Material de recolección de información.

Figura 37. Hoja de resultado de la medición del caudal del río proporcionada por el aparato OTT MF pro en formato .TSV (Valores Separados por Tabulaciones, por sus siglas en inglés).

```

Nombre perfil: RT13
Nombre operador: Aurorita Espinal
09:23:42 13.05.2022

Referencia fase: 15,00 m

Modelo: MF pro
n/s: 00000337317
Arr.: v1,00
Aplicación: v1,06

Tipo sensor: Veloc. y profund.
n/s: 170230338117
Arr.: v1,00
Aplicación: v1,02

Filtr.: FPA Parám.: 30 s
Pre-filtro: Activado Rang.: 5
IEM: 60 Hz

Entrada estación: No fijo
Cálculo de flujo: Mitad secc
Margen de inicio: -
Nº de estaciones: 13
Ancho corr.: 6,000 m
Descarga total: 2,993 m3/d
Área total: 9,925 m2
Prof. media: 1,654 m

Resultados medición:

```

Tpo	Estación	Ubicación (m)	Método	Prof. (m)	Factor margen	Superficie (m/s)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)
09:07:04	1	0,500	1 punto	-0,677	0,000	0,000	0,000	0,000
09:08:43	2	1,000	1 punto	-0,586	0,000	0,000	0,145	0,000
09:09:52	3	1,500	1 punto	-0,518	0,000	0,000	0,411	0,000
09:11:20	4	2,000	1 punto	-0,564	0,000	0,000	0,446	0,000
09:13:17	5	2,500	1 punto	-0,574	0,000	0,000	0,513	0,000
09:14:45	6	3,500	1 punto	0,640	0,000	0,000	0,599	0,000
09:16:09	7	3,500	1 punto	0,544	0,000	0,000	0,670	0,000
09:17:09	8	4,000	1 punto	0,592	0,000	0,000	0,512	0,000
09:18:04	9	4,500	1 punto	0,677	0,000	0,000	0,598	0,000
09:19:25	10	5,000	1 punto	0,652	0,000	0,000	0,510	0,000
09:21:36	11	0,000	1 punto	0,704	0,000	0,000	0,285	0,000
09:22:27	12	6,000	1 punto	0,678	0,000	0,000	0,374	0,000
09:23:26	13	6,500	1 punto	0,638	0,000	0,000	0,004	0,000

Figura 38. Encuesta aplicada a los actores claves de la microcuenca.

Percepción y conocimiento local sobre las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en los territorios urbanos - Microcuenca del río Torres, San José

Estimado (a) participante:

Usted está siendo invitado a llenar la siguiente encuesta con preguntas planteadas las cuales se espera que responda según las experiencias que ha tenido en relación con los esfuerzos que se han venido haciendo sobre el río Torres en cuanto a la rehabilitación de áreas del corredor biológico con diferentes alternativas de trama verde que se han o se están implementando para aumentar la provisión de servicios ecosistémicos en el medio urbano.

Para continuar, me gustaría recordarle a que nos estamos refiriendo con las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en esta encuesta. Las SbN Son las alternativas para responder a los diversos desafíos que enfrenta la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria o el riesgo a desastres, abarca todas aquellas acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen (UICN 2017).

Su participación en este estudio es completamente voluntaria y no hay riesgos previsible en este proyecto de investigación. Sin embargo, es muy importante para mí cómo investigadora conocer sus opiniones.

Para consultas en particular sobre las preguntas en cuestión, puede comunicarse con Aurorita Espinal al celular número: +506 64068528 o al correo electrónico: aurorita.espinal@cate.ac.cr

Gracias de ante mano por su tiempo y apoyo.

1. Nombre: _____

2. Dirección de correo electrónico: _____

3. Institución/Organización a la que pertenece: _____

4. ¿Cuál es su actividad y objetivo central? _____

5. Desde su experiencia, ¿Qué tipo de Soluciones basadas en las Naturaleza (SbN) o buenas prácticas está aplicando su institución/Organización para la gestión urbana sostenible en el Corredor Biológico Interurbano Río Torres (CBIRT)? Marque una o varias con una X.

a. Parques urbanos

b. Arboización en margen de ríos

c. Jardines verticales

d. Biojardíneras

e. Techos verdes

f. Recolección de agua lluvia

g. Otras. Especificar

6. ¿Por qué ha decidido implementar esta o estas alternativas? _____

7. ¿Estas SbN han tenido un seguimiento de monitoreo? Marque con una X.

a. Si

b. No

8. Si la respuesta anterior ha sido "Si" ¿Cuál ha sido el resultado o el aprendizaje? Y si la respuesta ha sido "No" ¿Cuál ha fue el inconveniente? _____

9. En su opinión, ¿qué es lo que ha hecho falta alcanzar o ha hecho falta aprender más en este proceso de rehabilitación del corredor biológico? _____

10. ¿Ha pensado en alguna otra SbN que no se haya implementado y que usted esté interesado (a) en sugerirnos? _____

11. En una escala del 0 a 5 (0: Deficiente 5: Excelente) Como calificaría las siguientes SbN para ser implementadas en el CBIRT:

Aspectos para evaluar para cada SbN propuesta:

- Pertinencia de la SbN para la microcuenca/corredor biológico
- Funcionalidad para mantener los servicios ecosistémicos prioritarios
- Disponibilidad de información, recursos y capacidad de los actores para implementarla

SbN	0 deficiente	1 aceptable	2 regular	3 bueno	4 muy bueno	5 excelente
Pavimentos porosos						
Jardines de lluvia						
Techos verdes						
Barriles de lluvia						
Plantación de árboles						

12. ¿Está interesado (a) en conocer los resultados de una modelación hidrológica aplicada a la microcuenca del río Torres que simula los efectos positivos que se tienen al implementar SbN para disminuir la cantidad de flujo generada por la escorrentía pluvial, la carga de contaminantes, entre otros servicios ecosistémicos? Marque con una X.

a. Si

b. No

13. Al observar los resultados positivos sobre la implementación de SbN para transformar los entornos urbanos en ciudades sostenibles ¿Cree usted que su Institución/Organización estaría interesado en incluir las SbN mejor evaluadas en las herramientas de gestión sobre e CBIRT? Marque con una X.

a. Si

b. No

c. Parcialmente

14. ¿Qué estrategias o medidas considera que hay que realizar por su organización y/o asociados para implementar más y mejor estas SbN? Marque una o varias con una X.

a. Financiamiento

b. Capacitación sobre las técnicas de SbN

c. Cabildeo político para que se incluya en el presupuesto municipal

d. Gestionar/promover una ley, normativa, ordenanza que facilite

e. Otras. Especificar

Modelación hidrológica

Anexo 1. Script de R utilizado para el preprocesamiento de la información metodológica al formato requerido por el modelo.

```
##### CLIMA #####
library(readxl)
library(tidyverse)
library(tidyr)
library(vroom)
library(mean)
#fast reading / importing of data
#-----
# Directorio de trabajo
setwd(choose.dir("C:/clima_R"))
dir()

#-----
# Cargar el archivo
tempe <- vroom::vroom("temperatura.csv")

#-----
# Proceso para pasar todas las columnas a una sola columna
df.tempe <- as.data.frame(tempe)
head(df.tempe)
colm3_a_33 <- (df.tempe[, 3:33]) #seleccionamos las columnas 4 a la 27
names(colm3_a_33) # ver los nombres de las columnas
df.t <- as.data.frame(t(colm3_a_33)) # pasar las columnas a filas o viceversa
fix(df.t) #visualizar la tabla
df.t$pp <- df.t$V1 #creae una columna
# Esta función agrega todas las columnas en una debajo de la otra
una.fila <- data.frame(ppt= unlist(df.t[,1:83]))
head(una.fila, 48) # ver los primeros 48 números
library(readxl)
write.csv(una.fila, "ppt_una_fila.xlsx")

#-----
```

Anexo 2. Configuración de la cadena del script de HydroPlus.exe utilizada en la modelación hidrológica para el caso base, configurada en Notepad+.

```
!--HydroPlusConfig_Writer_Version_1.1-->
<!--Date 2021-12-16 11:40:32.872455 -->
<HydroPlusConfig>
  <SimulationStringParams>
    <OutputDirectory>C:\Simulacion\outputs\2021\</OutputDirectory><!--Output
path-->
    <OutputTimeStep>Hourly</OutputTimeStep><!--Options: NoCalibration |
Hourly | Weekly | Daily-->
```

```

    <CalibrationTimeStep>NoCalibration</CalibrationTimeStep><!--Options:
NoCalibration | Hourly | Weekly | Daily-->
    <Flag_ExtendedOutputs>1</Flag_ExtendedOutputs><!--Options: 0=None;
1=Time Series Outputs-->
    <Model>StatisticalHydro</Model><!--Options: StatisticalHydro |
SpatialTemperatureHydro | LCScalingTempSpatial | CoolRiver | ECDynamic -->
    <Infiltration>ExponentialDecay</Infiltration><!--Options: ExponentialDecay |
PowerDecay-->
    <FlowPathAlgorithm>DInfinity</FlowPathAlgorithm><!--Options: DInfinity |
MFD | D8; Describes DEM flow routing method-->
    <Flag_Recompute_TopographicIndex>0</Flag_Recompute_TopographicIndex>
<!--Options: 0 or 1; 0=Use existing TI data 1=Recompute TI data -->
    <Flag_TI_PerviousOnly>1</Flag_TI_PerviousOnly> <!--Options: 0 or 1; 0=No
restriction on TI area 1=Restrict TI to pervious area as TopUrban by Valeo -->
    <RefParamFolder>0,0</RefParamFolder><!--Options: 0 | 0; DataDrawer &
DataFolder w/ Reference parameters; 0 = first-->
</SimulationStringParams>
<SimulationNumericalParams>
    <StartDay>20210101</StartDay><!--Date format: YYYYMMDD; Must be date
contained in meteorological input files-->
    <EndDay>20211230</EndDay><!--Date format: YYYYMMDD; Used to define
TotalTimeSteps = [(EndDay+1)- StartDay] * 24-->
    <CatchmentArea_m2>50236863</CatchmentArea_m2><!--Options: > 0; total
simulated area within DEM.dat, excluding -9999; units m^2-->
    <TopographicIndexBins>30</TopographicIndexBins><!--Options: 1 to 30; bins
for topographic index-->
    <TotalTimeSteps> </TotalTimeSteps><!--Options: empty or > 0; Use > 0 to
redefine TotalTimeSteps; units h-->
    <TimeStep_sec>3600</TimeStep_sec><!--Options: 0 or higher; time step
between rows of meteorological inputs; units s-->
</SimulationNumericalParams>
<DataOrganizer>
    <DataDrawer>
    <DataFolder>
        <Type>BulkArea</Type><!--Options: BulkArea; BulkArea required for 1st
DataFolder in DataDrawer-->
        <Area_m2>50236863</Area_m2><!--Options: Hydro = CatchmentArea_m2 -
sum(other DataFolder Area) | CoolAir = cellsize^2; units m^2-->

<TreeCanopyCover_overPervious_frac>0.3004</TreeCanopyCover_overPervious_frac
><!--Options: >= 0; tree canopy over pervious; units fraction-->

<TreeCanopyCover_overImpervious_frac>0.0133</TreeCanopyCover_overImpervious
_frac><!--Options: >= 0; tree canopy over impervious; units fraction-->

<ShortVegCover_noTreeCanopy_frac>0.2211</ShortVegCover_noTreeCanopy_frac><
!--Options: >= 0; short vegetation no tree canopy; units fraction-->
    <SoilCover_noTreeCanopy_frac>0.0601</SoilCover_noTreeCanopy_frac><!--
Options: >= 0; soil no tree canopy; units fraction-->

```

<WaterCover_noTreeCanopy_frac>0.0009</WaterCover_noTreeCanopy_frac><!--
 Options: >= 0; water no tree canopy; units fraction-->

<ImperviousCover_noTreeCanopy_frac>0.4042</ImperviousCover_noTreeCanopy_fra
 c><!--Options: >= 0; impervious no tree canopy; units fraction-->

<DCIA_frac>0.6</DCIA_frac>

<ImperviousDepressionStorage_mm>2.5</ImperviousDepressionStorage_mm><!--
 Options: >= 0; average storage depth; units mm-->

<PerviousDepressionStorage_mm>5.0</PerviousDepressionStorage_mm>

<WaterDepressionStorage_mm>0.0</WaterDepressionStorage_mm><!-- Options:
 >=0; average storage depth; units mm -->

<Soil_WiltingPoint_m3pm3>0.03</Soil_WiltingPoint_m3pm3>

<Soil_FieldCapacity_m3pm3>0.19</Soil_FieldCapacity_m3pm3>

<Soil_SaturationPoint_m3pm3>0.51</Soil_SaturationPoint_m3pm3>

<Soil_Porosity_m3pm3>0.51</Soil_Porosity_m3pm3>

<Soil_MoistureInitial_m3pm3>0.19</Soil_MoistureInitial_m3pm3>

<Evapotranspiration_Depth_m>1.0</Evapotranspiration_Depth_m>

<Soil_Macropore_frac>0.0</Soil_Macropore_frac>

<InfiltrationExcessGovernedArea_frac>1.0</InfiltrationExcessGovernedArea_frac><!--
 Options: 0 to 1; area with Green-Ampt infiltration; units fraction-->

<K0_mph>0.061</K0_mph>

<WFS_m>0.279</WFS_m>

<Td_h>10</Td_h><!--Options: >0; time delay in draining unsaturated zone; units h-
 -->

<Q0_mph>1e-05</Q0_mph>

<T0_m2ph>0.15</T0_m2ph>

<n>2</n><!--Options: > 0; scale parameter of power function optionally used for
 decay of hydraulic conductivity-->

<m>0.023</m><!--Scale parameter of soil transmissivity-->

<PAQ_RT_A_h>40.0</PAQ_RT_A_h><!--Options: > 0; time constant a for
 pervious area flow; units h-->

<PAQ_RT_B_h>40.0</PAQ_RT_B_h><!--Options: > 0; time constant b for
 pervious area flow; units h-->

<DCIAQ_RT_A_h>40.0</DCIAQ_RT_A_h><!--Options: > 0; time constant a for
 impervious area flow; units h-->

<DCIAQ_RT_B_h>40.0</DCIAQ_RT_B_h><!--Options: > 0; time constant b for
 impervious area flow; units h-->

<SSQ_RT_h>120.0</SSQ_RT_h><!--Options: > 0; time constant for subsurface
 flow; units h-->

<TreeLAI>5.0</TreeLAI>

<ShortVegLAI>2.1</ShortVegLAI>

<LeafOnDay>1</LeafOnDay>

<LeafOffDay>365</LeafOffDay>

<LeafTransDays>28</LeafTransDays>

<EvergreenTreeCover_frac>1.0</EvergreenTreeCover_frac>

<TreeBAI>1.7</TreeBAI><!--Options: >= 0; Bark area index for canopy area; units
 m2/m2-->

<EverGreenShrubCover_frac>1.0</EverGreenShrubCover_frac>

<ShrubBAI>0.5</ShrubBAI><!--Options: >= 0; Bark area index for short veg; units
 m2/m2-->

```

    <TreeLeafStorage_mm>0.2</TreeLeafStorage_mm><!--Options: >= 0; Average
depth of water on LAI w/ units mm-->
  </DataFolder>
</DataDrawer>
</DataOrganizer>
</HydroPlusConfig>

```

Anexo 3. Configuración de la cadena de la script de HydroPlus.exe utilizada en la modelación de las IV, configurada en Notepad+.

```

<!--HydroPlusConfig_Writer_Version_1.1-->
<!--Date 2021-12-16 11:40:32.872455 -->
<HydroPlusConfig>
  <SimulationStringParams>
    <OutputDirectory>C:\Simulacion\outputs\Greeninfraestructure\Bioretention\</O
utputDirectory><!--Output path-->
    <OutputTimeStep>Hourly</OutputTimeStep><!--Options: NoCalibration |
Hourly | Weekly | Daily-->
    <CalibrationTimeStep>NoCalibration</CalibrationTimeStep><!--Options:
NoCalibration | Hourly | Weekly | Daily-->
    <Flag_ExtendedOutputs>1</Flag_ExtendedOutputs><!--Options: 0=None;
1=Time Series Outputs-->
    <Model>StatisticalHydro</Model><!--Options: StatisticalHydro |
SpatialTemperatureHydro | LCScalingTempSpatial | CoolRiver | ECDynamic -->
    <Infiltration>ExponentialDecay</Infiltration><!--Options: ExponentialDecay |
PowerDecay-->
    <FlowPathAlgorithm>DInfinity</FlowPathAlgorithm><!--Options: DInfinity |
MFD | D8; Describes DEM flow routing method-->
    <Flag_Recompute_TopographicIndex>0</Flag_Recompute_TopographicIndex>
<!--Options: 0 or 1; 0=Use existing TI data 1=Recompute TI data -->
    <Flag_TI_PerviousOnly>1</Flag_TI_PerviousOnly> <!--Options: 0 or 1; 0=No
restriction on TI area 1=Restrict TI to pervious area as TopUrban by Valeo -->
    <RefParamFolder>0,0</RefParamFolder><!--Options: 0 | 0; DataDrawer &
DataFolder w/ Reference parameters; 0 = first-->
  </SimulationStringParams>
  <SimulationNumericalParams>
    <StartDay>20210101</StartDay><!--Date format: YYYYMMDD; Must be date
contained in meteorological input files-->
    <EndDay>20211230</EndDay><!--Date format: YYYYMMDD; Used to define
TotalTimeSteps = [(EndDay+1)- StartDay] * 24-->
    <CatchmentArea_m2>50236863</CatchmentArea_m2><!--Options: > 0; total
simulated area within DEM.dat, excluding -9999; units m^2-->
    <TopographicIndexBins>30</TopographicIndexBins><!--Options: 1 to 30; bins
for topographic index-->
    <TotalTimeSteps> </TotalTimeSteps><!--Options: empty or > 0; Use > 0 to
redefine TotalTimeSteps; units h-->
    <TimeStep_sec>3600</TimeStep_sec><!--Options: 0 or higher; time step
between rows of meteorological inputs; units s-->
  </SimulationNumericalParams>

```

<DataOrganizer>
 <DataDrawer>
 <DataFolder>
 <Type>BulkArea</Type><!--Options: BulkArea; BulkArea required for 1st DataFolder in DataDrawer-->
 <Area_m2>29926286.74</Area_m2><!--Options: Hydro = CatchmentArea_m2 - sum(other DataFolder Area) | CoolAir = cellsize^2; units m^2-->

 <TreeCanopyCover_overPervious_frac>0.3004</TreeCanopyCover_overPervious_frac><!--Options: >= 0; tree canopy over pervious; units fraction-->

 <TreeCanopyCover_overImpervious_frac>0.0133</TreeCanopyCover_overImpervious_frac><!--Options: >= 0; tree canopy over impervious; units fraction-->

 <ShortVegCover_noTreeCanopy_frac>0.2340</ShortVegCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; short vegetation no tree canopy; units fraction-->
 <SoilCover_noTreeCanopy_frac>0.2493</SoilCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; soil no tree canopy; units fraction-->
 <WaterCover_noTreeCanopy_frac>0.0009</WaterCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; water no tree canopy; units fraction-->

 <ImperviousCover_noTreeCanopy_frac>0.2021</ImperviousCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; impervious no tree canopy; units fraction-->
 <DCIA_frac>0.4</DCIA_frac>
 <ImperviousDepressionStorage_mm>1.14</ImperviousDepressionStorage_mm><!--Options: >= 0; average storage depth; units mm-->
 <PerviousDepressionStorage_mm>5.0</PerviousDepressionStorage_mm>
 <WaterDepressionStorage_mm>0.0</WaterDepressionStorage_mm><!--Options: >=0; average storage depth; units mm -->
 <Soil_WiltingPoint_m3pm3>0.03</Soil_WiltingPoint_m3pm3>
 <Soil_FieldCapacity_m3pm3>0.19</Soil_FieldCapacity_m3pm3>
 <Soil_SaturationPoint_m3pm3>0.51</Soil_SaturationPoint_m3pm3>
 <Soil_Porosity_m3pm3>0.51</Soil_Porosity_m3pm3>
 <Soil_MoistureInitial_m3pm3>0.125</Soil_MoistureInitial_m3pm3>
 <Evapotranspiration_Depth_m>1.0</Evapotranspiration_Depth_m>
 <Soil_Macropore_frac>0.0</Soil_Macropore_frac>
 <InfiltrationExcessGovernedArea_frac>1.0</InfiltrationExcessGovernedArea_frac><!--Options: 0 to 1; area with Green-Ampt infiltration; units fraction-->
 <K0_mph>0.061</K0_mph>
 <WFS_m>0.279</WFS_m>
 <Td_h>10</Td_h><!--Options: >0; time delay in draining unsaturated zone; units h-->
 ->
 <Q0_mph>1e-05</Q0_mph>
 <T0_m2ph>0.15</T0_m2ph>
 <n>2</n><!--Options: > 0; scale parameter of power function optionally used for decay of hydraulic conductivity-->
 <m>0.023</m><!--Scale parameter of soil transmissivity-->
 <PAQ_RT_A_h>40.0</PAQ_RT_A_h><!--Options: > 0; time constant a for pervious area flow; units h-->

<PAQ_RT_B_h>40.0</PAQ_RT_B_h><!--Options: > 0; time constant b for pervious area flow; units h-->

<DCIAQ_RT_A_h>40.0</DCIAQ_RT_A_h><!--Options: > 0; time constant a for impervious area flow; units h-->

<DCIAQ_RT_B_h>40.0</DCIAQ_RT_B_h><!--Options: > 0; time constant b for impervious area flow; units h-->

<SSQ_RT_h>120.0</SSQ_RT_h><!--Options: > 0; time constant for subsurface flow; units h-->

<TreeLAI>5.0</TreeLAI>

<ShortVegLAI>2.1</ShortVegLAI>

<LeafOnDay>1</LeafOnDay>

<LeafOffDay>365</LeafOffDay>

<LeafTransDays>28</LeafTransDays>

<EvergreenTreeCover_frac>1.0</EvergreenTreeCover_frac>

<TreeBAI>1.7</TreeBAI><!--Options: >= 0; Bark area index for canopy area; units m2/m2-->

<EverGreenShrubCover_frac>1.0</EverGreenShrubCover_frac>

<ShrubBAI>0.5</ShrubBAI><!--Options: >= 0; Bark area index for short veg; units m2/m2-->

<TreeLeafStorage_mm>0.2</TreeLeafStorage_mm><!--Options: >= 0; Average depth of water on LAI w/ units mm-->

</DataFolder>

<DataFolder>

<Type>BioRetention</Type><!-- Options: RainGarden; BioRetention; InfilTrench; Swale; PermeablePavement; GreenRoof; RoofDisconnect; RainBarrel -->

<Area_m2>20310576.26</Area_m2><!-- Options: 0 to CatchmentArea_m2; Area of all GI units or devices in DataFolder; units m^2 -->

<Count_GI_Units>30.0</Count_GI_Units><!--Options: >= 0; Number of GI units capturing runoff from BulkArea in this DataFolder-->

<ImpAreaTreated_frac>0.4000</ImpAreaTreated_frac><!--Options: 0 to 1; Fraction of BulkArea impervious captured by GI units-->

<PerAreaTreated_frac>0.0198</PerAreaTreated_frac><!--Options: 0 to 1; Fraction of BulkArea pervious captured by GI units-->

<WaterAreaTreated_frac>0.0</WaterAreaTreated_frac><!--Options: 0 to 1; Fraction of BulkArea water captured by GI units-->

<TreeCanopyCover_overPervious_frac>0.0</TreeCanopyCover_overPervious_frac><!--Options: >= 0; tree canopy over pervious; units fraction-->

<TreeCanopyCover_overImpervious_frac>0.0</TreeCanopyCover_overImpervious_frac><!--Options: >= 0; tree canopy over impervious; units fraction-->

<ShortVegCover_noTreeCanopy_frac>0.5</ShortVegCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; short vegetation no tree canopy; units fraction-->

<SoilCover_noTreeCanopy_frac>0.5</SoilCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; soil no tree canopy; units fraction-->

<WaterCover_noTreeCanopy_frac>0.0</WaterCover_noTreeCanopy_frac> <!--Options: >= 0; water no tree canopy; units fraction -->

<ImperviousCover_noTreeCanopy_frac>0.0</ImperviousCover_noTreeCanopy_frac><!--Options: >= 0; impervious no tree canopy; units fraction-->

<DCIA_frac>0.0</DCIA_frac><!--Options: 0 to 1; directly connected impervious area draining to outlet; units fraction-->

<ImperviousDepressionStorage_mm>0.0</ImperviousDepressionStorage_mm><!--Options: >= 0; average storage depth; units mm-->

<PerviousDepressionStorage_mm>0.0</PerviousDepressionStorage_mm><!--Options: >= 0; average ponding depth; units mm-->

<WaterCover_noTreeCanopy_frac>0.0</WaterCover_noTreeCanopy_frac> <!--Options: >= 0; water no tree canopy; units fraction -->

<Soil_WiltingPoint_m3pm3>0.1</Soil_WiltingPoint_m3pm3><!--Options: 0 to 1; soil wilting point; units m3/m3-->

<Soil_FieldCapacity_m3pm3>0.2</Soil_FieldCapacity_m3pm3><!--Options: 0 to 1; soil field capacity; units m3/m3-->

<Soil_SaturationPoint_m3pm3>0.4</Soil_SaturationPoint_m3pm3><!--Options: 0 to 1; soil saturation point; units m3/m3-->

<Soil_Porosity_m3pm3>0.4</Soil_Porosity_m3pm3><!--Options: 0 to 1; soil porosity; units m3/m3-->

<Soil_MoistureInitial_m3pm3>0.125</Soil_MoistureInitial_m3pm3><!--Options: 0 to 1; initial moisture point; units m3/m3 -->

<Evapotranspiration_Depth_m>1.0</Evapotranspiration_Depth_m><!--Options: >=0; depth accessible to evapotranspiration demand; units m-->

<Soil_Macropore_frac>0.0</Soil_Macropore_frac><!--Options: 0 to 1; soil macropore fraction-->

<InfiltrationExcessGovernedArea_frac>1.0</InfiltrationExcessGovernedArea_frac><!--Options: 0 to 1; area with Green-Ampt infiltration; units fraction-->

<K0_mph>0.03</K0_mph><!--Defines soil hydraulic conductivity at saturation; units m/h-->

<WFS_m>0.0612</WFS_m><!--Options: > 0; soil wetting front suction for Green-Ampt infiltration; units m-->

<TreeLAI>0.0</TreeLAI><!--Options: >= 0; Leaf area index for canopy area; units m2/m2-->

<ShortVegLAI>0.0</ShortVegLAI><!--Options: >= 0; Leaf area index for short veg area; units m2/m2-->

<LeafOnDay>1</LeafOnDay><!--Option: 1 to maximum Julian Day in Year; day when tree reaches maximum LAI-->

<LeafOffDay>365</LeafOffDay><!--Option: value > LeafOnDay; day when deciduous leaf has LAI = 0-->

<LeafTransDays>28</LeafTransDays><!--Option: >= 0; days prior to LeafOnDay when LAI transitions min to max-->

<EvergreenTreeCover_frac>0.0</EvergreenTreeCover_frac><!--Options: 0 to 1; Portion of tree cover that is evergreen; units fraction-->

<TreeBAI>0.0</TreeBAI><!--Options: >= 0; Bark area index for canopy area; units m2/m2-->

<EverGreenShrubCover_frac>0.0</EverGreenShrubCover_frac><!--Options: 0 to 1; Portion of veg cover that is evergreen; units fraction-->

<ShrubBAI>0.0</ShrubBAI><!--Options: >= 0; Bark area index for short veg; units m2/m2-->

```

    <TreeLeafStorage_mm>0.0</TreeLeafStorage_mm><!--Options: >= 0; Average
depth of water on LAI w/ units mm-->
    <Surface_Berm_Height_m>0.2</Surface_Berm_Height_m><!--Options: >= 0;
Height of GI surface berm above which water spills out; units m-->
    <Surface_Outlet_Offset_m>0.15</Surface_Outlet_Offset_m><!--Options: >= 0;
Height of GI surface outlet above which water discharges out; units m-->
    <Surface_Outlet_LongSlope_mpm>0.015</Surface_Outlet_LongSlope_mpm><!--
Options: >= 0; longitudinal slope of outlet; units m/m-->
    <Surface_Outlet_ManningRoughness>0.1</Surface_Outlet_ManningRoughness><!--
-Options: >= 0; Manning n roughness value for outlet; unitless-->
    <Surface_Porosity_m3pm3>0.8</Surface_Porosity_m3pm3><!--Options: 0 to 1;
porosity of GI surface volume due to plants etc.; units m3/m3-->
    <Surface_Outlet_Width_m>4.0</Surface_Outlet_Width_m><!--Options: >= 0;
bottom width of GI surface outlet; units m-->
    <Soil_Thickness_m>0.2023</Soil_Thickness_m><!--Options: >= 0; thickness of GI
soil layer; units m-->
    <Soil_PercolationDecay_Coeff>10.0</Soil_PercolationDecay_Coeff><!--Options:
>= 0; reduces percolation rate as exp(-Coeff) w 0=no reduction; unitless-->
    <Vault_Thickness_m>0.8</Vault_Thickness_m><!--Options: >= 0; thickness of GI
subsurface storage layer; units m-->
    <Vault_Porosity_m3pm3>0.4</Vault_Porosity_m3pm3><!--Options: 0 to 1;
porosity of GI subsurface storage; units m3/m3-->
    <Vault_Outlet_Offset_m>0.05</Vault_Outlet_Offset_m><!--Options: >= 0; height
of drainage pipe invert above GI subsurface storage layer base; units m-->
    <Vault_Outlet_Discharge_Coeff>0.3</Vault_Outlet_Discharge_Coeff><!--Options:
>= 0; regulates discharge rate starting w 0=no drainage; unitless-->
    <Vault_Outlet_Discharge_Exponent>0.9</Vault_Outlet_Discharge_Exponent><!--
Options: 0 to 1; discharge increases as value increases; unitless-->
    <Vault_Outlet_ManningRoughness>0.12</Vault_Outlet_ManningRoughness><!--
Options: >= 0; Manning n roughness value for outlet; unitless-->
    <Vault_Outlet_Delay_hr>0</Vault_Outlet_Delay_hr> <!-- Options: >= 0; Time
after rain stops when drain is opened; units hr -->
    <Flag_Exfiltration_to_Catchment>1</Flag_Exfiltration_to_Catchment><!--Options:
0 or 1; 0=no exfiltration for GI; 1=exfiltration; unitless -->
    <Exfiltration_Limit_m>1E4</Exfiltration_Limit_m><!--Options: >= 0; stormwater
depth treated before completely clogged; units m--></DataFolder>
</DataFolder>
</DataDrawer>
</DataOrganizer>
</HydroPlusConfig>

```