

# ASADAS RESILIENTES

Análisis hidrológico, geográfico y territorial para 60 ASADAS ubicadas en las subcuencas: río Virilla, río Grande, río Grande de Candelaria, río Pirris y río Reventazón





**“PROYECTO  
“ASADAS RESILIENTES”**

**ESTUDIO DE LA SITUACIÓN HIDROLÓGICA, AMENAZAS  
AL RECURSO HÍDRICO Y ZONIFICACIÓN DE LA  
VULNERABILIDAD TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA**

**- ASADA -**

**TARBACA DE ASERRÍ, SAN JOSÉ**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>III. ASADA – BARRIO LAS MERCEDES ASERRÍ</b> .....	<b>5</b>
3.1 INFORMACIÓN DE LA ASADA .....	5
<b>IV. METODOLOGÍA</b> .....	<b>6</b>
4.1 METODOLOGÍA: BASE DE DATOS TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA DE LA ASADA.....	6
4.2 METODOLOGÍA: BASE DE DATOS, MAPAS Y GRÁFICOS DEL ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO ..	8
4.3 METODOLOGÍA: AMENAZA Y VULNERABILIDADES AL RECURSO HÍDRICO .....	13
4.4 METODOLOGÍA: SÍNTESIS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE AMENAZA HIDROMETEOROLÓGICA Y DE VULNERABILIDAD TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA.....	17
<b>V. RESULTADO</b> .....	<b>18</b>
5.1 RESULTADO: BASE DE DATOS TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA DE LA ASADA .....	18
5.2 RESULTADO: BASE DE DATOS, MAPAS Y GRÁFICOS DEL ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO .....	27
5.3 RESULTADO: ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS Y VULNERABILIDAD AL RECURSO HÍDRICO.....	41
5.4 RESULTADO: SÍNTESIS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE AMENAZA HIDROMETEOROLÓGICA Y DE VULNERABILIDAD TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA.....	46
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>49</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación territorial y geográfica de las microcuencas que tiene como área de influencia las fuentes de captación de agua de la ASADA. ....	5
<b>Figura 2.</b> Comparación directa del dato de la fuente global WorldClim con las estaciones meteorológicas de datos observados del IMN, mediante correlaciones de Pearson, Spearman, RMSE y sesgo. ....	9
<b>Figura 3.</b> Distribución de datos mensuales de lluvia comparando la fuente global de WorldClim con el dato observado del IMN en forma de cajas. Este gráfico representa los datos dentro del intervalo de los percentiles 25 y 75% con la línea interior que refleja el promedio. Las barras de error muestran la distribución de los datos hasta el percentil 10 y 90% con puntos que reflejan los valores más extremos. ....	10
<b>Figura 4.</b> Flujograma de cálculo del Índice de Contaminación No Puntual-ICNP. ....	14
<b>Figura 5.</b> Microcuencas con sus fuentes de captación de agua de la ASADA. ....	20
<b>Figura 6.</b> Promedio anual histórico de lluvia (pcp) y de la temperatura máxima (tmax) de WorldClim ensamblado a un tamaño de píxel de 1 km <sup>2</sup> en la zona de estudio de las 60 ASADAS. ....	29
<b>Figura 7.</b> Gráficos de comparación del histórico (azul) con el escenario futuro (rojo) de las variables temperatura máxima y precipitación de la ASADA. ....	35
<b>Figura 8.</b> Cambios temporales del balance climático (BC) histórico (negro) y futuro (rojo = SSP 2.6 y azul = SSP 8.5) de la ASADA. ....	37
<b>Figura 9.</b> Cambios temporales del índice de aridez (IA) histórico (negro) y futuro (rojo = SSP 2.6 y azul = SSP 8.5) de la ASADA. ....	37
<b>Figura 10.</b> SPI categorizado para los datos históricos (1990 al 2014) y futuros (2021 al 2040) con escenario optimistas (SSP 2.6). ....	39
<b>Figura 11.</b> SPI categorizado para los datos históricos (1990 al 2014) y futuros (2021 al 2040) con escenario pesimistas (SSP 8.5). ....	40
<b>Figura 12.</b> Zonificación del índice potencial de contaminación no puntual (ICNP o PNPI) o contaminación difusa de la ASADA. ....	41
<b>Figura 13.</b> Zonificación del potencial de producción de sedimentos exportado al drenaje superficial de ríos y riachuelos de la ASADA. ....	42
<b>Figura 14.</b> Zonificación del potencial de susceptibilidad a deslizamientos de la ASADA. ....	43
<b>Figura 15.</b> Zonificación del índice de vulnerabilidad total de la ASADA con sus respectivas áreas potenciales de recarga hídrica. ....	44

---

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Clases y valores del Índice de Contaminación No Puntual-ICNP (PNPI). .....	15
<b>Cuadro 2.</b> Clases y valores del Índice de Vulnerabilidad Total (IVT). .....	17
<b>Cuadro 3.</b> Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010301) de la ASADA. ....	21
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010302) de la ASADA. ....	22
<b>Cuadro 5.</b> Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010303) de la ASADA. ....	23
<b>Cuadro 6.</b> Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010304) de la ASADA. ....	25
<b>Cuadro 7.</b> Estadísticas descriptivas (Min, Max, mediana-P50, promedio - avg, y los percentiles 10 y 90) de los índices BC y IA. ....	38

## I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la gestión sostenible de los recursos hídricos en Costa Rica, se destaca la importancia de las Asociaciones Administradoras de Acueductos y Alcantarillados (ASADA) como actores clave en la provisión y administración del agua potable. Es por ello, que CEDARENA<sup>1</sup>, en asociación con AyA<sup>2</sup> y la cooperación de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), están ejecutando el proyecto **“Fortalecimiento de las ASADAS del GAM y ciudades periféricas para la mejora de su resiliencia frente al cambio climático”**, conocido como **“ASADAS resilientes”**, el cual tiene como objetivo, fortalecer las capacidades de estas asociaciones para enfrentar su resiliencia ante los fenómenos de cambio climático que pudieran afectar sus servicios en el futuro.

En ese sentido, el CATIE<sup>3</sup> a través de la Unidad de Cuencas, Seguridad Hídrica y Suelos, ha desarrollado el componente **“Análisis Hidrológico, Geográfico y Territorial para 60 ASADAS Ubicadas en las Subcuencas: río Virilla, río Grande, río Grande de Candelaria, río Pirris y río Reventazón”**, que forma parte integral del proyecto **“ASADAS resilientes”** y como resultado se tiene el presente informe final.

En términos práctico, el informe está dividido en seis contenidos (I. Introducción, II. Objetivos, III. ASADA su información básica, IV. Metodología, V. Resultados y VI. Bibliografía), el cual tiene como objetivo presentar un documento descriptivo que permita al usuario de la ASADA comprender la información suministrada como **base de datos** (mapas, figuras, cuadros, etc.). A continuación, se muestra la organización de la base de datos de la ASADA en sus respectivas carpetas:

- a) Base de datos de la ASADA
- b) Base de datos territorial y geográfica
- c) Base de datos hidrometeorológica histórica y futura
- d) Zonificación de amenazas y vulnerabilidad al recurso hídrico
- e) Informe de la ASADA

En resumen, este documento descriptivo se presenta como una herramienta técnica esencial para la planificación del recurso hídrico de la ASADA. Esto, se fundamenta en el análisis exhaustivo de información proveniente de datos territoriales y geográficos, de los análisis hidrometeorológicos actual y futuro, y de la zonificación de las amenazas y vulnerabilidades en las microcuencas que tiene como área de influencia las fuentes de captación de agua de la ASADA. La integración de estos datos en una “base de datos”, proporciona un respaldo sólido a los futuros proyectos de la ASADA, permitiendo además contar con una visión completa del pasado histórico y del futuro en términos climáticos. En conclusión, el documento se torna esencial para la toma de decisiones relacionadas con el recurso hídrico de la ASADA en el corto, mediano y largo plazo.

---

<sup>1</sup> Centro de Derecho Ambiental y los Recursos Naturales.

<sup>2</sup> Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

<sup>3</sup> Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

## II. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la situación territorial y geográfica, hidrometeorológica, así como las amenazas y vulnerabilidades de las microcuencas que tiene como área de influencia las fuentes de captación de agua de la ASADA, en el marco del proyecto “ASADAS RESILIENTES” con el fin de identificar vacíos de información y generar conocimiento útil para la adaptación al cambio climático de la ASADA.

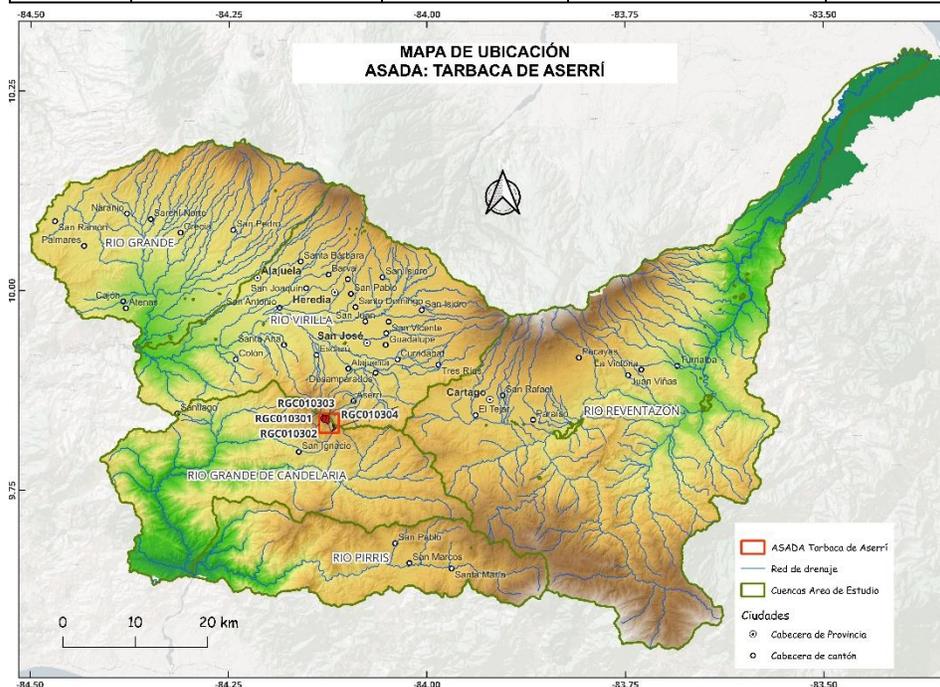
### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar una base de datos territorial y geográfica de la o las microcuencas hidrográficas que influyen en las fuentes de captación de agua de la ASADA.
2. Elaborar la base de datos, mapas y gráficos como resultado del estudio hidrometeorológico.
3. Realizar la zonificación de las amenazas y vulnerabilidades asociadas al recurso hídrico en la o las microcuencas de las fuentes de captación agua de la ASADA.
4. Sintetizar medidas de adaptación frente a la amenaza hidrometeorológica y de vulnerabilidad territorial y geográfica en las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la ASADA.

## III. ASADA – TARBACA DE ASERRÍ, SAN JOSÉ

### 3.1 INFORMACIÓN DE LA ASADA

GRUPO	Grupo geográfico	Nombre	Responsable	Teléfono	EMAIL
1	ASADA – Tarbaca de Aserrí	Bryan Ramírez	2500-0359		<a href="mailto:asada-tarbaca@hotmail.com">asada-tarbaca@hotmail.com</a>



**Figura 1.** Ubicación territorial y geográfica de las microcuencas que tiene como área de influencia las fuentes de captación de agua de la ASADA.

La figura muestra las microcuencas de la ASADA y las cinco (5) cuencas del proyecto: RV (Río Virilla), RGC (Río Grande de Candelaria), RG (Río Grande), RP (Río Pirris) y RR (Río Reventazón).

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1 METODOLOGÍA: BASE DE DATOS TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA DE LA ASADA

#### a. Base de datos de la o las microcuencas y de las fuentes de captación de agua de la ASADA

Metodológicamente, la creación de la base de datos territorial y geográfica de la o las microcuencas, cuya área de influencia abarca las fuentes de captación de agua de la ASADA, se llevó a cabo mediante un proceso estructurado, que se describe a continuación:

- 1) Se realizó una exhaustiva consulta a diversas fuentes de datos para el área de estudio de la ASADA. Entre estas fuentes se incluyen:
  - Atlas de Costa Rica 2014 (Ortíz Malavasi, 2014).
  - Curvas a Nivel 1:5k del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (SNIT, s/f).
  - Modelo de elevación digital del proyecto SRTM (OpenTopography - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global, s/f).
  - Modelo de elevación digital (MED) ALOS-PALSAR.
  - Modelo de elevación digital (ASF DAAC, 2015).
  - Modelos digitales de terreno CRDTM2020 y CRDTM2020plus (Pimenova et al. 2022).

Posterior de una evaluación de las diferentes fuentes consultadas, a excepción de la última “CRDTM2020 y CRDTM2020plus (Pimenova et al. 2022)<sup>4</sup>”, se decidió trabajar con el modelo de elevación digital (MED) ALOS-PALSAR, el cual tiene una resolución de píxeles de 12.5 x 12.5 metros. Para el caso del modelo de elevación digital (MED) del Atlas de Costa Rica, se presume que su fuente de dato es derivada de las curvas a nivel a escala 1:25,000 del IGN, cuyos píxeles excede el tamaño requerido por el proyecto de 1 km<sup>2</sup>. Por lo tanto, no se utilizó las curvas, puesto que los algoritmos aplicados para convertir curvas en formato vectorial a un MED ráster generaron artefactos que afectaban el trazo de las microcuencas a la escala muy grande como las requeridas en este caso. Una vez que se decidió utilizar el MED ALOS-PALSAR, se procedió a descargar los paneles de datos que cubrían la totalidad del área de estudio.

#### 2) Trazo y delimitación de la o las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la ASADA:

Para el trazo o delimitación de las microcuencas, se utilizó el algoritmo r.watershed del programa GRASS 8.0. Este algoritmo permite trabaja con el MED acondicionado como entrada, junto con un parámetro importante que permite regular la densidad de la red de drenaje generada y, por ende, la cantidad de microcuencas que genera el algoritmo. Para obtener un nivel de microcuencas aceptable, se hicieron varias pruebas del algoritmo hasta obtener un producto, que según nuestra experiencia y

---

<sup>4</sup> Para el caso de los modelos digitales de terreno (MED) CRDTM2020plus, tiene un tamaño de píxel de 30 x 30 metros y, se decidió no utilizarlo porque no llena los requerimientos establecidos en los TDR para esta capa.

conocimiento de la zona está acorde con la precisión de los datos y con la necesidad del proyecto; en este caso, del MED digital y la red de drenaje. En resumen, el producto resultante se consideró coherente con la precisión de los datos disponibles, incluyendo el MED digital y la red de drenaje.

### 3) Codificación de la o las microcuencas:

Cada microcuenca fue codificada de acuerdo con el siguiente proceso:

- *Código de cuenca mayor:* corresponde a las dos o tres letras que representan las iniciales de las cuencas hidrográficas de mayor superficie de la zona de estudio, por ejemplo: RV (Río Virilla), RGC (Río Grande de Candelaria), RG (Río Grande), RP (Río Pirrís) y RR (Río Reventazón).
- *Código de grupo geográfico:* la ASADA fue agrupada de acuerdo con su proximidad geográfica a seis zonas, por ejemplo: 01 – Aserrí-Acosta, 02 – Puriscal-Mora, 03 – Alajuela-Heredia, 04 – Grecia-Naranjo, 05 – Santos-El Guarco y 06 – Cartago-Turrialba.
- *Código de ASADA:* es un código correlativo de 01 a 06.
- *Código de microcuencas:* es un código correlativo que varía de 01 al número total de microcuencas que tenga la ASADA.
- *Código de la fuente de captación:* es un código correlativo que oscila de 01 al número de fuentes de captación de agua que tenga la ASADA. Este código, se va enumerando en el sentido de la manecilla del reloj.

### 4) Elaboración de la base de datos de las fuentes de captación de agua de las ASADAS:

Para elaborar la base de datos de las fuentes de captación de agua, se realizaron los siguientes pasos:

- Solicitud a la ASADA de la información geográfica de sus fuentes de captación de agua.
- Homologación de las coordenadas geográficas de las fuentes de captación al sistema CRTM05 (Costa Rica Transversal de Mercator 2005).
- Construcción de la base de datos, cuyo contenido tiene el nombre de la ASADA, el nombre de la fuente de captación, el tipo de fuente, las coordenadas geográficas originales, las coordenadas CR05, un campo de chequeo de errores de localización y, por último, el código asignado a cada fuente de captación de agua de la ASADA.

### 5) Organización de la base de datos en el directorio de trabajo:

Cada microcuenca fue organizada en su propio directorio de trabajo, denominado con el nombre de la ASADA, y contiene la siguiente información:

- Archivo shapefile de las fuentes de captación de agua de cada microcuenca, con nombres que comienzan con el prefijo “**N\_asada\_**” seguido del nombre de la ASADA.
- Archivo shapefile de la red de drenaje de cada microcuenca, con nombres que comienzan con el prefijo “**Red\_Drenaje\_**” seguido del nombre de la ASADA.
- Archivo vectoriales o shapefile con la delimitación de la o las microcuencas, con nombres que comienzan con el prefijo “**Microcuencas\_**” seguido del nombre de la ASADA.
- Archivo shapefile de la cobertura del suelo de cada microcuenca, con nombres que comienzan con el prefijo “**Cobertura\_**” seguido del nombre de la ASADA.

## **b. Parámetros morfométricos de la o las microcuencas**

El cálculo de los parámetros morfométricos<sup>5</sup> de la o las microcuencas se adaptó a la disponibilidad de los datos existentes, los cuales provienen del MED ALOS-PALSAR, con un tamaño de píxel de 12.5 x 12.5 metros. La metodología empleada se fundamentó en un código desarrollado en el lenguaje de programación R por “María Cristina Arenas”, disponible en el siguiente enlace: <https://rpubs.com/marenas/971000>. Para la ejecución del código, se utilizaron diversos paquetes, tales como raster, RSAGA, terra, rgdal, lubridate, sf, sp, gstat, hydroTSM, entre otros. El resultado de la aplicación del código proporciona los valores de los parámetros morfométricos básicos, generando un informe de la o las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la ASADA.

Este enfoque metodológico garantiza la coherencia y precisión en la estimación de los parámetros morfométricos de cada microcuenca de la ASADA, lo que facilita la generación de informes específicos que servirán de base para nuevos estudios y para la toma de decisiones o bien para la implementación de medidas de adaptación adecuadas en la gestión de recursos hídricos en la ASADA.

## **4.2 METODOLOGÍA: BASE DE DATOS, MAPAS Y GRÁFICOS DEL ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO**

### **a. Base de datos de la serie actual (o serie histórica)**

La metodología empleada para la elaboración de la base de datos hidrometeorológica de la serie histórica de las 60 ASADAS del proyecto, incluyendo su ASADA, se fundamenta en la recopilación de datos mensuales de lluvia (PCP), de temperatura mínima (Tmín.) y máxima (Tmáx.) desde 1990 hasta 2014. Estos datos globales de WorldClim, originalmente tienen un tamaño de 2.5 km<sup>2</sup> de píxel, los cuales fueron ajustados a un tamaño de 1 km<sup>2</sup> de píxel mediante interpolación bilineal, utilizando como referencia la base de datos del Modelo Digital de Elevación debidamente ajustado a 1 km<sup>2</sup>.

La fuente de la base de datos es totalmente gratuita y puede ser descargada en el siguiente enlace: <https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html>. La referencia técnica de la base de datos de la serie histórica de WorldClim se encuentra debidamente citada para garantizar la transparencia y credibilidad de la información:

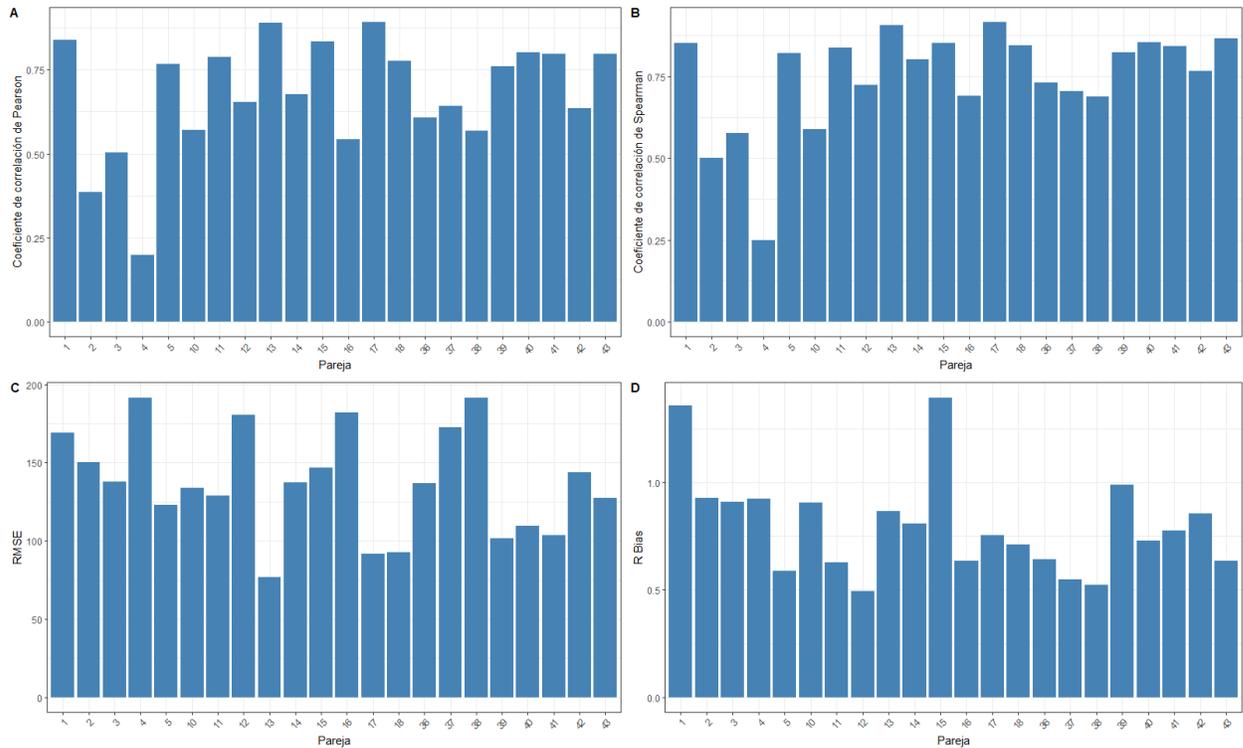
*Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P.D., Lister, D.H. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data 7: 109.*

Posteriormente, se compararon los datos históricos de la fuente global de WorldClim con datos observados de 22 estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) correspondiente a la misma zona de las 60 ASADAS del proyecto. Se utilizaron los registros de variable de longitud con un mínimo de 5 años y menos del 5% de datos faltantes dentro del periodo de 1990 al 2014 y 2020. Esta comparación directa entre puntos (estaciones meteorológicas) y píxeles (datos

---

<sup>5</sup> Los parámetros morfométricos describen índices o coeficientes que sirven de referencia para la categorización de las cuencas hidrográficas. Además, proporcionan información a estudios que intentan conocer más en detalle el funcionamiento hidrológico e hidráulico de una cuenca, subcuenca o microcuenca (Villón 2004; TRAGSA et al. 1998).

WorldClim) incluyó el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, así como el uso de criterios como la raíz cuadrada del promedio de los errores cuadrados (RMSE, por sus siglas en inglés) y el sesgo (RBias, por sus siglas en inglés). La derivación de este análisis se presenta de manera gráfica en las siguientes figuras, proporcionando así una evaluación detallada de la concordancia entre ambas fuentes de datos.

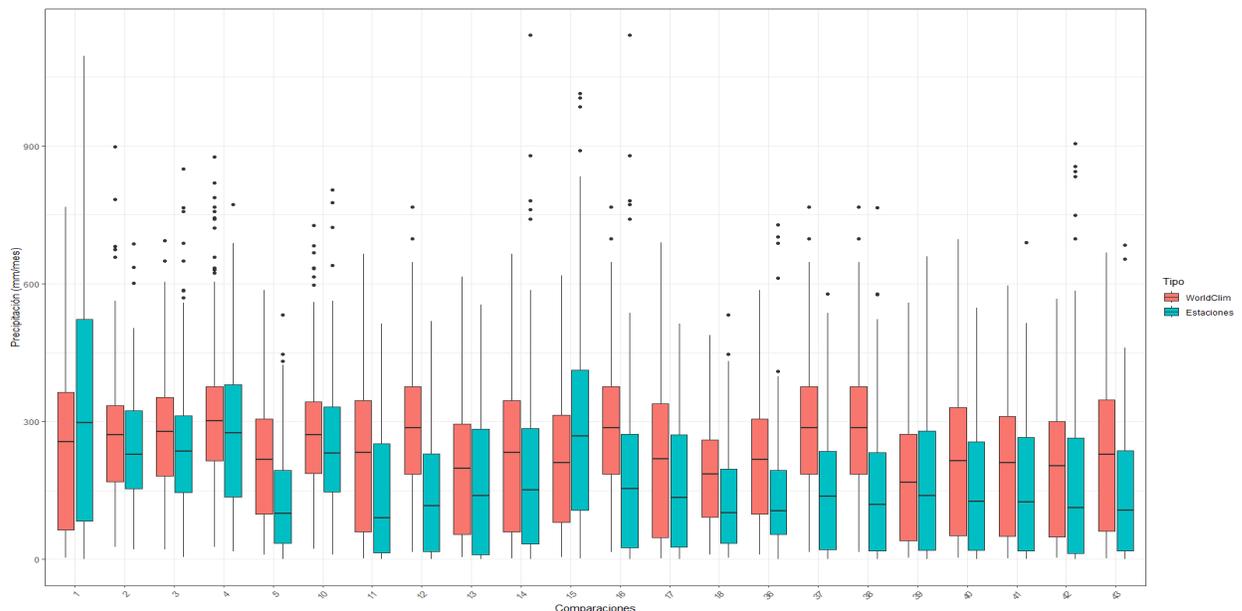


**Figura 2.** Comparación directa del dato de la fuente global WorldClim con las estaciones meteorológicas de datos observados del IMN, mediante correlaciones de Pearson, Spearman, RMSE y sesgo.

De las 22 estaciones meteorológicas evaluadas, a excepción de una, todas exhibieron correlaciones superiores a 0.5, destacando que la mayoría alcanzó correlaciones por encima de 0.7. El error promedio observado fue de 110 mm en el volumen de lluvia, con sesgos por debajo de 1. Estos resultados indican que ambas fuentes de datos siguen de cerca la dinámica estacional de la lluvia, y que la discrepancia entre ellas es relativamente mínima. En situaciones donde se observó y midió la lluvia, el producto global de WorldClim mostró un error generalmente pequeño, respaldando así la coherencia y validez de esta información global obtenida y procesada para este estudio.

Adicionalmente, se procedió a visualizar las distribuciones de los datos de lluvia emparejando cada estación meteorológica con la fuente global de datos de WorldClim (ver figura a continuación), generando un total de 22 parejas. Las distribuciones, en su mayoría, presentaron concordancias, lo que refleja la variabilidad de las precipitaciones en la zona de estudio, especialmente entre la estación seca, caracterizada por lluvias mínimas, y la estación lluviosa, con valores mensuales que superan los 500 mm. Además, se observó una tendencia general de subestimación en la lluvia acumulada y la temperatura, con errores de hasta un 20 y 5%, respectivamente. Estos resultados contribuyen a una

comprensión más detallada de las discrepancias y similitudes entre las diferentes fuentes de datos, enriqueciendo la evaluación de la validez de la información recopilada y procesada.



**Figura 3.** Distribución de datos mensuales de lluvia comparando la fuente global de WorldClim con el dato observado del IMN en forma de cajas. Este gráfico representa los datos dentro del intervalo de los percentiles 25 y 75% con la línea interior que refleja el promedio. Las barras de error muestran la distribución de los datos hasta el percentil 10 y 90% con puntos que reflejan los valores más extremos.

Dada la alta correspondencia entre los datos globales de WorldClim y la mayoría de las estaciones meteorológicas del IMN, metodológicamente se optó por no aplicar una corrección adicional aparte del ajuste de escala a una resolución común de 1 km<sup>2</sup> de píxel para el análisis hidrometeorológico posterior. El producto ajustado de WorldClim se convirtió en la base para la corrección de sesgos de los modelos de cambio climático seleccionados.

### **b. Base de datos de las series futuras para cada escenario y momento temporal**

Desde una perspectiva metodológica, la construcción de la base de datos para las series futuras se sustentó en los modelos climáticos más recientes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), específicamente los modelos CMIP6. Estos modelos, originalmente configurados con un tamaño de píxel de 50 km<sup>2</sup>, fueron ajustado o ensamblado mediante interpolación bilineal para adaptarlos a un tamaño de píxel más fino de 1 km<sup>2</sup>. Para este proceso de ajuste, se tomaron como base los datos mensuales de lluvia (PCP), temperatura mínima (TMÍN.) y máxima (TMÁX.) del periodo histórico comprendido entre 1990 y 2014, proporcionando así una base sólida y coherente para las proyecciones climáticas futuras.

Posteriormente, se llevó a cabo una cuidadosa selección entre los 21 modelos climáticos disponibles, finalmente se optó por aquellos que mejor se adecuaron a las condiciones climáticas históricas de Centroamérica, según lo establecido por Hidalgo et al. (2016). Los modelos elegidos fueron el MIROC 6 y el CMCC-ESM2, los cuales fueron promediados para la realización de este estudio, conformando un único escenario futuro que aborda tanto las proyecciones optimistas de emisiones (SSP 1.26) como

las pesimistas (SSP 5.85). Esta estrategia de selección rigurosa y de combinación de modelos proporciona una base sólida para explorar y contrastar los posibles escenarios climáticos futuros.

La fuente de los datos es gratuita y puede ser descargado en el siguiente enlace: <https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-6-cmip6/> La referencia técnica del proceso metodológico está sustentada en la siguiente bibliografía:

*Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.*

En lo que respecta a la corrección del modelo climático promediado y ajustado a la escala espacial de estudio (1 km<sup>2</sup>), se desarrolló de la siguiente manera:

**Corrección de sesgos de los datos simulados en período histórico;** se empleó el método de corrección de sesgos con el fin de ajustar la serie de datos simulados para asegurar que su variabilidad se asemeje a la serie de datos observados, logrando así una equiparación de los percentiles entre ambas series. Esto, se logró siguiendo la metodología propuesta por Pierce et al. (2009), que se resume en:

- 1- Se ordenan los datos observados y simulados de menor a mayor.
- 2- Se calcula el percentil que cada uno de los valores simulados utilizando la ecuación.

$$P_{Csim} = \frac{Ov_{sim}}{Nv_{sim}+1} \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

$P_{Csim}$ : Percentil del valor simulado.

$Ov_{sim}$ : Orden del valor simulado.

$Nv_{sim}$ : Número de valores simulados.

- 3- El percentil resultante es identificado en la serie de datos observados, cuyo valor se considera como dato corregido para la serie simulada.

**Corrección de sesgos de los datos simulados en período futuro;** para la corrección de los sesgos de la serie de datos del período futuro, se aplicaron los siguientes pasos:

- 1- Para cada valor del período futuro, se busca el valor más cercano del período simulado histórico sin corregir y su respectivo valor corregido (según el proceso anterior).
- 2- Mediante la presente ecuación, se obtiene el valor corregido en el período futuro.

$$V_{SFC} = \frac{V_{SFO} * V_{SHC}}{V_{SHO}} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde:

$V_{SFC}$ : Valor simulado en período futuro, corregido.

$V_{SFO}$ : Valor simulado en período futuro, original.

$V_{SHC}$ : Valor simulado en período histórico, corregido.

$V_{SHO}$ : Valor simulado en período histórico, original.

La referencia técnica del proceso se encuentra sustentada en la siguiente bibliografía:

Pierce D, Cayan D, Maurer E et al. (2015) Improved bias correction techniques for hydrological simulations of climate change. *Journal of Hydrometeorology* 16: 2421–2442. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0236.1.

### **c. Comparación del clima histórico con los escenarios futuros**

Con la base climatológica (PCP, Tmín. y Tmáx.) histórica ajustada a 1 km<sup>2</sup> para la zona de estudio y corregida por sesgos utilizando los datos verificados de WorldClim como referencia, se obtuvieron las series mensuales históricas de 1990 al 2014 y las series para el futuro cercano del 2021 al 2040 para los escenarios de futuras de emisiones optimistas (SSP 2.6) y como contraste pesimista (SSP 8.5). Se utilizaron los centroides de las microcuencas de las fuentes de captación de agua delimitadas para la ASADA con el fin de calcular las estadísticas descriptivas básicas (mín., máx., media y promedio), así como para una visualización comparativa de la serie histórica y la de futuro, con el propósito de identificar posibles cambios.

Metodológicamente, la visualización se basó en la distribución de los datos mensuales de toda la serie histórica de PCP, Tmín. y Tmáx. Este enfoque permite observar no solo los cambios en los valores de la media, sino también en los extremos de las variables climáticas estudiadas. Se proporciona una base de datos de todas las series resultantes producto de los cálculos anteriormente explicados en formato “.netcdf” junto con carpetas que contienen las estadísticas en formato de tabla “.xlsx” y gráficos de la ASADA en formato “.tif”.

### **d. Balance climático (BC) mensual histórico y futuro**

El cálculo del balance climático (BC) implicó la substracción de la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación (P), representada por la ecuación  $BC = P - ETP$ . En este proceso, se empleó la ecuación para calcular la ETP mensual en mm, utilizando los valores promedio, máximo y mínimo de la temperatura (Tmedia, Tmáx., Tmín.), junto con la radiación extraterrestre Ra. La ecuación para el cálculo de la evapotranspiración potencial corresponde a:

$$ETP = 0.0023 (T_{media} + 17.8) (T_{máx.} - T_{mín.})^{0.5} \times Ra \quad \text{ecuación 3}$$

El cálculo del BC se realizó de manera mensual para cada mes de la serie histórica (1990 a 2014) y de la serie futura (2021 a 2040), considerando los dos escenarios de clima futuro: SSP 2.6 y 8.5.

### **e. Índice de Aridez (IA) mensual histórico y futuro**

El cálculo del Índice de Aridez (IA) fue realizado aplicando la siguiente ecuación  $IA = P/ETP$ , siguiendo la metodología propuesta por Budyko (1972), donde se realiza la resta de 1 para obtener el índice en forma de  $IA = P/ETP - 1$ . Este cálculo se realizó para cada mes de la serie histórica (1990 a 2014) y futura (2021 a 2040), considerando los escenarios climáticos SSP 2.6 y 8.5. Además, se generó un resumen estadístico que incluye los valores mínimos, máximos, mediana, promedio, percentil 10 y percentil 90 de la ASADA, tanto para el Balance Climático (BC) como para el Índice de Aridez (IA).

## **f. Análisis de extremos históricos y futuros (déficit y superávit de agua) a través del índice estandarizada de precipitación (SPI)**

La metodología empleada para analizar los extremos de lluvia se fundamenta en el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), según la metodología propuesta por McKee et al. (1993) y calculado mediante la técnica de Beguera et al. (2016), para categorizar los déficits y superávits de agua con respecto al promedio, permitiendo así evaluar las condiciones de sequía o humedad. Las métricas de superávit y déficit mensual de agua de magnitud, duración y frecuencia se calcularon de forma tabulada para la ASADA, considerando tanto la serie histórica como la serie futura para cada escenario de cambio climático. El SPI fue categorizado de forma visual a través de un mapa de calor, para representar las categorías de sequías extremas, severas, moderadas, así como las categorías de humedad moderada, severa y extrema. Esta representación gráfica, que utiliza un rango de colores, facilita la identificación visual de los diferentes niveles de déficit (sequía) o superávit (humedad) de lluvia en la o las microcuencas de la ASADA.

### **4.3 METODOLOGÍA: AMENAZA Y VULNERABILIDADES AL RECURSO HÍDRICO**

#### **a. Zonificación de las zonas potenciales de recarga y de deslizamientos**

Metodológicamente, la zonificación potencial de recarga acuífera de la o las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la ASADA se basó en gradientes isotópicas (oxígeno-18 en lluvia y agua subterránea), según lo publicado por Sánchez-Murillo y Birkel (2016)<sup>6</sup>.

En lo que respecta a la metodología aplicada para determinar las áreas de susceptibilidad a deslizamientos mediante el método morfométrico, se llevó a cabo a través de los siguientes pasos:

1. Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) ALOS PALSAR de 12.5 metros, donde en ArcGIS se aplicó la herramienta Fill para corregir posibles errores presentes en el DEM.
2. Luego, utilizando el programa SAGA y el DEM corregido, se procedió al cálculo de las variables de pendiente y LS Factor mediante Geoprocessing - Terrain analysis – Basic Terrain Analysis, así como el cálculo de la variable Terrain Ruggedness Index – TRI aplicando Geoprocessing - Terrain analysis – Morphometry.
3. En ArcGIS, utilizando la herramienta Line Density (Spatial Analyst), se calcularon las variables de Densidad de Curvas (DC) y Densidad de Ríos (DR).
4. Se procedió a la estandarización de todas las variables a rangos de entre 0 a 1 mediante el Raster Calculator de ArcGIS y aplicando la siguiente ecuación ( $\frac{"raster" - "raster".minimum}{"raster".maximum - "raster".minimum} * 1$ ).
5. Con el Raster Calculator de ArcGIS, se realizó la suma de las cinco variables (TRI + Slope + LS-Factor + DC + DR), obteniendo así los valores de las áreas con mayor susceptibilidad a

---

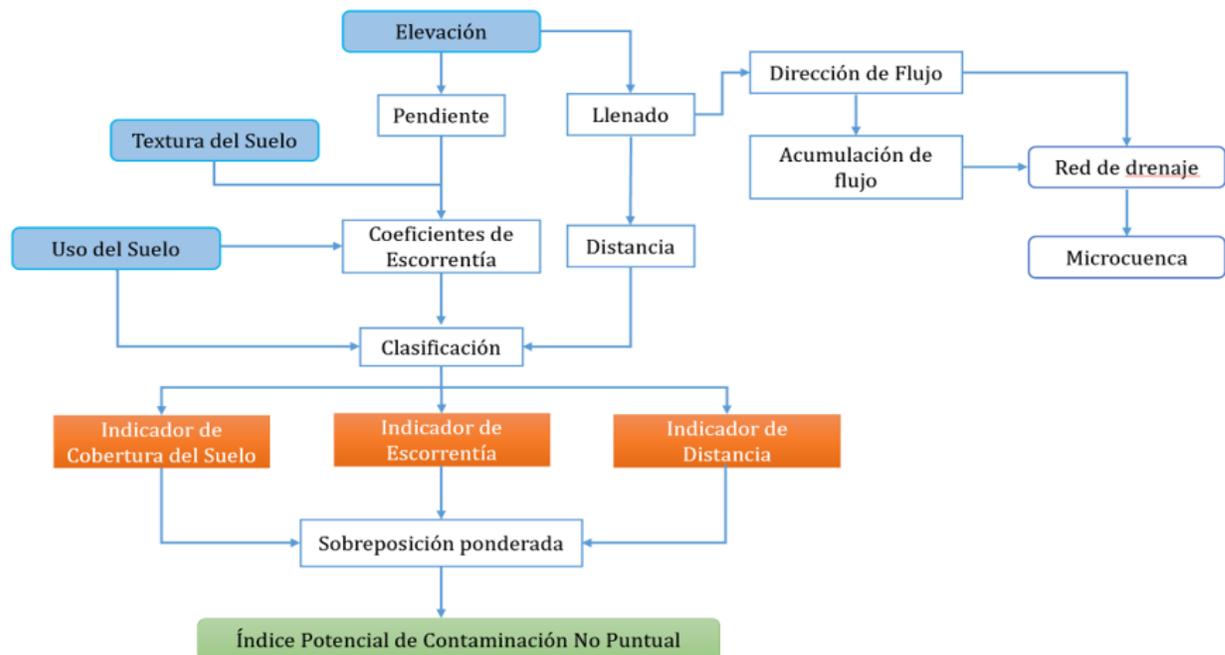
<sup>6</sup> Sánchez-Murillo, R., and C. Birkel (2016) Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068888.

deslizamientos. El resultado de esta ecuación se tradujo en el mapa de deslizamientos, el cual fue reclasificado en cinco categorías: muy alta, alta, media, baja y muy baja, utilizando el método de distribución espacial Natural Jenks.

El mapa resultante de este proceso se corresponde a la zonificación de deslizamientos en la o las microcuencas que abarcan las fuentes de captación de agua de la ASADA.

**b. Zonificación de las amenazas a la calidad de agua (contaminación difusa y sedimentos)**

Para elaborar los mapas de áreas potenciales de fuentes de contaminación difusa de la o las microcuencas, se empleó la herramienta del Índice de Contaminación No Puntual-ICNP (PNPI, por sus siglas en inglés) diseñada por Munafó et al., según lo descrito en el artículo publicado por Gosweiler et al. (2021). Est índice, se basa en evaluar la presión ejercida en ríos y otras fuentes de agua superficial por el uso de la tierra a través de una determinada cuenca, subcuenca o microcuenca. La metodología incorpora el conocimiento de expertos para asignar valores a cada indicador utilizado en la ponderación del índice. Teóricamente, la presión generada por la contaminación difusa en diferentes cuerpos de agua desde diversas unidades de tierra se expresa en el índice a través de tres indicadores fundamentales: el indicador de cobertura del suelo (LCI), el indicador de escorrentía (RoI) y el indicador de distancia a la red de drenaje superficial. De esta manera, la contribución potencial a la contaminación desde diversas áreas y la movilidad de los contaminantes están determinadas por la capacidad de retención y transporte de agua de las distintas zonas de la microcuenca, lo que proporciona un enfoque integral para identificar áreas críticas en términos de contaminación difusa en la o las microcuencas de la ASADA. A continuación, se presenta el diagrama de flujo utilizado para el cálculo del Índice de Contaminación No Puntual-ICNP (PNPI):



**Figura 4.** Flujograma de cálculo del Índice de Contaminación No Puntual-ICNP.

La implementación del ICNP fue realizado a través de la suma ponderada de los factores utilizando el programa QGIS, para generar un mapa que muestre la suma ponderada para cada píxel. La ecuación empleada se muestra a continuación:

$$ICNP = \sum_{i=1}^k w_i * x_i \quad \text{ecuación 4}$$

Donde

$K$  = número total de indicadores.

$w_i$  = un coeficiente de los pesos para cada indicador.

$x_i$  = el indicador correspondiente (LCI, Rol y DI) con valores entre 0 y 1.

Para este estudio, se aplicó la siguiente ecuación:

$$ICNP = LCI*5 + Rol*3 + DI*2 \quad \text{ecuación 5}$$

Los diferentes valores de ICNP fueron agregados en cinco clases, cuyo código de color y contaminación potencial son listados en el siguiente cuadro.

**Cuadro 1.** Clases y valores del Índice de Contaminación No Puntual-ICNP (PNPI).

Clases de ICNP	Valor de ICNP	Representación	Potencial de contaminación
0-2	0-2	Verde oscuro	Bajo
2-4	2.1-4	Verde claro	Medio bajo
4-6	4.1-6	Amarillo	Medio
6-8	6.1-8	Naranja	Medio alto
8-10	8.1-10	Rojo	Alto

Para realizar la zonificación de sedimentación en la o las microcuencas, se empleó el módulo de *Sediment Delivery Ratio* (SDR) de InVEST para modelar el flujo de sedimentos en las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la ASADA. El modelo InVEST de sedimento calcula la cantidad de pérdida de suelo anual y luego estima el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) que comprende la proporción de suelos que llega a la corriente superficial del drenaje superficial. El modelo asume que una vez que el suelo erosionado llega a la corriente terminará hasta la salida de la cuenca (Vigiak et al. 2012; Leon et al. 2015; Hamel et al. 2015; Sharp et al. 2018).

En el cálculo de la cantidad de suelo perdido por píxel, el modelo SDR de InVEST hace uso de la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE), mostrada a continuación:

$$Rusle_i = R_i * K_i * LS_i * C_i * P_i \quad \text{ecuación 6}$$

Donde:

$R_i$  = erosividad de la lluvia (unidades:  $MJ \cdot mm (ha \cdot hr)^{-1}$ ).

$K_i$  = erosionabilidad del suelo (unidades:  $ton \cdot ha \cdot hr (MJ \cdot ha \cdot mm)^{-1}$ ).

$LS_i$  = factor de longitud de pendiente (sin unidades),  $C$  = factor de gestión de cobertura (sin unidades).

$P_i$  = factor de práctica de apoyo (Renard et al. 1997; Hamel et al. 2015).

En cuanto al cálculo del coeficiente de aporte de sedimentos, este se realizó en función de la conectividad hidrológica del área, siguiendo un enfoque propuesto por Vigiak et al. (2012) y Hamel

et al. (2015). Inicialmente, se calcula el índice de conectividad (IC), que se refiere a la conectividad hidrológica de un píxel con la corriente superficial, basada en la contribución de la pendiente y la trayectoria del flujo (Borselli et al. 2008; Hamel et al. 2015). A continuación, se muestra la ecuación utilizada para el cálculo del índice de conectividad (IC):

$$IC = \log_{10} \frac{D_{up}}{D_{dn}} \quad \text{ecuación 7}$$

Donde:

$D_{up}$  = componente ascendente de la pendiente.

$D_{dn}$  = es el componente descendente de la pendiente.

Luego, el cálculo del coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) para cada píxel se derivó del índice de conductividad (IC) usando una función sigmoide, como se muestra a continuación (Vigiak et al. 2012; Hamel et al. 2015; Sharp et al. 2018).

$$SDR_i = \frac{SDR_{max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{K_b}\right)} \quad \text{ecuación 8}$$

Donde:

$SDR_{max}$  = es el máximo teórico SDR, definido como la proporción máxima de sedimento fino (<1000 $\mu$ m) que puede viajar a la corriente. En la ausencia de información detallada del suelo, toma por defecto el valor de 0.8 (Vigiak et al. 2012; Hamel et al. 2015).

IC y  $K_b$  = parámetros de calibración.

Para la estimación del sedimentos exportado que llegan a la salida de la corriente superficial (Hamel et al. 2015; Sharp et al. 2018), se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_i = Rusle_i * SDR_i \quad \text{ecuación 9}$$

Finalmente, se procedió con el cálculo total de sedimentos que llega a la salida de la corriente superficial de las microcuencas, que es la suma del sedimento exportado en cada píxel, es decir:

$$E = \sum_i E_i \quad \text{ecuación 10}$$

### c. Índice de vulnerabilidad de la o las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la ASADA

Los mapas de vulnerabilidad total para cada una de la o las microcuencas de la ASADA se elaboraron mediante un análisis de evaluación multicriterio. El propósito de este proceso fue integrar en un solo mapa un Índice de Vulnerabilidad Total (IVT), el cual englobará de manera ponderada el impacto de los mapas individualizados de contaminación, sedimentos y deslizamientos. Estos mapas temáticos, previamente estandarizados a valores enteros de 1 a 5, fueron sometidos a una suma ponderada para crear el índice compuesto que refleje la vulnerabilidad integral de la microcuenca. Este enfoque metodológico permite una representación visual y cuantitativa de la vulnerabilidad total, facilitando la identificación de áreas prioritarias para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

El modelo utilizado para el cálculo del IVT fue el siguiente:

$$IVT = Contaminación * 0.5 + Sedimentos * 0.30 + Deslizamientos * 0.20$$

El IVT tendrá rangos reales entre 1 y 5, el cual fue reclasificado de acuerdo con el siguiente cuadro:

**Cuadro 2. Clases y valores del Índice de Vulnerabilidad Total (IVT).**

Clases de IVT	Valor	Representación	Vulnerabilidad Total
1-1.25	1	Verde oscuro	Baja
1.25-2.0	2	Verde claro	Media baja
2.0-3.0	3	Amarillo	Media
3.0-4.0	4	Naranja	Media alta
4.0-5.0	5	Rojo	Alta

#### 4.4 METODOLOGÍA: SÍNTESIS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE AMENAZA HIDROMETEOROLÓGICA Y DE VULNERABILIDAD TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA

La estrategia utilizada para desarrollar la síntesis de medidas de adaptación frente a la amenaza hidrometeorológica y de vulnerabilidad territorial y geográfica para las microcuencas que tienen como área de influencia las fuentes de captación de agua de la ASADA se ha concebido con una perspectiva integral. Metodológicamente la descripción engloba todas las fases detalladas en el estudio hidrometeorológico, desde la evaluación y análisis de la base de las microcuencas, su climatológica hasta la identificación de áreas susceptibles a las amenazas y vulnerabilidades territorial y geográfica.

Estas medidas abarcan acciones generales y puntuales, como la mitigación de riesgos, la gestión de amenazas y vulnerabilidades en las microcuencas, el fortalecimiento de la infraestructura de la ASADA, la promoción de prácticas sostenibles, entre otras iniciativas destinadas a mejorar la resiliencia y a reducir o bien mitigar la vulnerabilidad territorial y geográfica de las microcuencas asociadas a la ASADA.

## V. RESULTADO

### 5.1 RESULTADO: BASE DE DATOS TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA DE LA ASADA

#### a. Base de datos de la ASADA

Es una base de datos con información general de la ASADA y se encuentra contenida en la carpeta  a) Base de datos de la ASADA , esta aloja cuatro archivos en formato Excel con información básica de la ASADA e información de sus fuentes de captación de agua. Asimismo, incluye una carpeta llamada  Afiche del proyecto - ASADAS RESILIENTES donde encontrará la siguiente información:

-  AFICHE\_HIDROMETEOROLOGICO
-  AFICHE\_ZONIFICACION\_DE\_AMENAZAS
-  FOLLETO\_INFORMACIÓN\_DEL PROYECTO

#### b. Base de datos de la o las microcuencas y fuentes de captación de agua

A continuación, se hace una descripción de la organización de la base de datos territorial y geográfica de la o las microcuencas que comprenden las áreas de influencia de las fuentes de captación de agua de la ASADA, junto con el tipo de información que la contiene. Información que tiene como objetivo proveer una comprensión del funcionamiento hidrológico, territorial y geográfico de la ASADA.

En la carpeta  b) Base de datos territorial y geográfica , encontrará las siguientes carpetas e información:

-  Microcuencas y fuentes de captación de agua
-  Parámetros\_morfométricos\_ASADA
-  Uso\_cobertura\_microcuencas\_ASADA
-  Localizacion\_ASADA

En la carpeta  Microcuencas y fuentes de captación de agua -> se encuentra contenida la siguiente información:

-  layers
-  microcuencas\_fuentes\_de\_captacion\_agua
-  Tarbaca de Aserri
-  tomas\_asada\_tarbaca\_aserri

 layers -> aloja la información geoespacial en formato tipo ráster (.tif) y vectoriales (.shp). El detalle de la información se describe a continuación:

<ul style="list-style-type: none"> <li> DEM ALOS-PALSAR corregido</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas globales 1250.cpg</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas globales 1250.dbf</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas globales 1250.prj</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas globales 1250.qmd</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas globales 1250.shp</li> <li> Microcuencas globales 1250</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas_Tarbaca de Aserri.cpg</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas_Tarbaca de Aserri.dbf</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas_Tarbaca de Aserri.prj</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas_Tarbaca de Aserri.qix</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas_Tarbaca de Aserri.qmd</li> <li><input type="checkbox"/> Microcuencas_Tarbaca de Aserri.shp</li> <li> Microcuencas_Tarbaca de Aserri</li> <li><input type="checkbox"/> N_asada_Tarbaca de Aserri.cpg</li> <li><input type="checkbox"/> N_asada_Tarbaca de Aserri.dbf</li> <li><input type="checkbox"/> N_asada_Tarbaca de Aserri.prj</li> <li><input type="checkbox"/> N_asada_Tarbaca de Aserri.shp</li> <li> N_asada_Tarbaca de Aserri</li> <li><input type="checkbox"/> Red de drenaje 1250.cpg</li> <li><input type="checkbox"/> Red de drenaje 1250.dbf</li> <li><input type="checkbox"/> Red de drenaje 1250.prj</li> <li><input type="checkbox"/> Red de drenaje 1250.shp</li> <li> Red de drenaje 1250</li> <li><input type="checkbox"/> Red_Drenaje_Tarbaca de Aserri.cpg</li> <li><input type="checkbox"/> Red_Drenaje_Tarbaca de Aserri.dbf</li> <li><input type="checkbox"/> Red_Drenaje_Tarbaca de Aserri.prj</li> <li><input type="checkbox"/> Red_Drenaje_Tarbaca de Aserri.qmd</li> <li><input type="checkbox"/> Red_Drenaje_Tarbaca de Aserri.shp</li> <li> Red_Drenaje_Tarbaca de Aserri</li> <li> Sombreado DEM ALOS-PALSAR corregido</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- MED ALOS-PALSAR corregido; con píxel de 12.5 x 12.5 metros, en formato ráster (.tif).</li> <li>- Microcuencas globales 1250: polígonos vectoriales, en formato .shp del área total del proyecto. Microcuencas delimitadas a partir de un tamaño mínimo de polígono exterior de 1250.</li> <li>- Microcuencas de la ASADA: son las microcuencas que tienen como áreas de influencia las fuentes de captación de agua de la ASADA, en formato vectorial (.shp).</li> <li>- Archivo N_asada...: son las fuentes de captación de agua de la ASADA, en formato vectorial (.shp).</li> <li>- Red de drenaje de 1250: ríos perennes o intermitentes de las microcuencas generadas para un tamaño mínimo de polígono exterior de 1250 para el área del proyecto, en formato vectorial (.shp).</li> <li>- Red de drenaje de la ASADA: drenaje superficial intermitente de cada microcuenca de la ASADA, en formato vectorial (.shp).</li> <li>- DEM sombreado: con píxel de 12.5 x 12.5 metros, en formato ráster (.tif)."</li> </ul>
---	---

**Tarbaca de Aserri** -> es un archivo en formato Excel, que contiene el proceso de la codificación de la o las microcuencas y de sus fuentes de captación de agua de la ASADA, ver detalle en el siguiente cuadro:

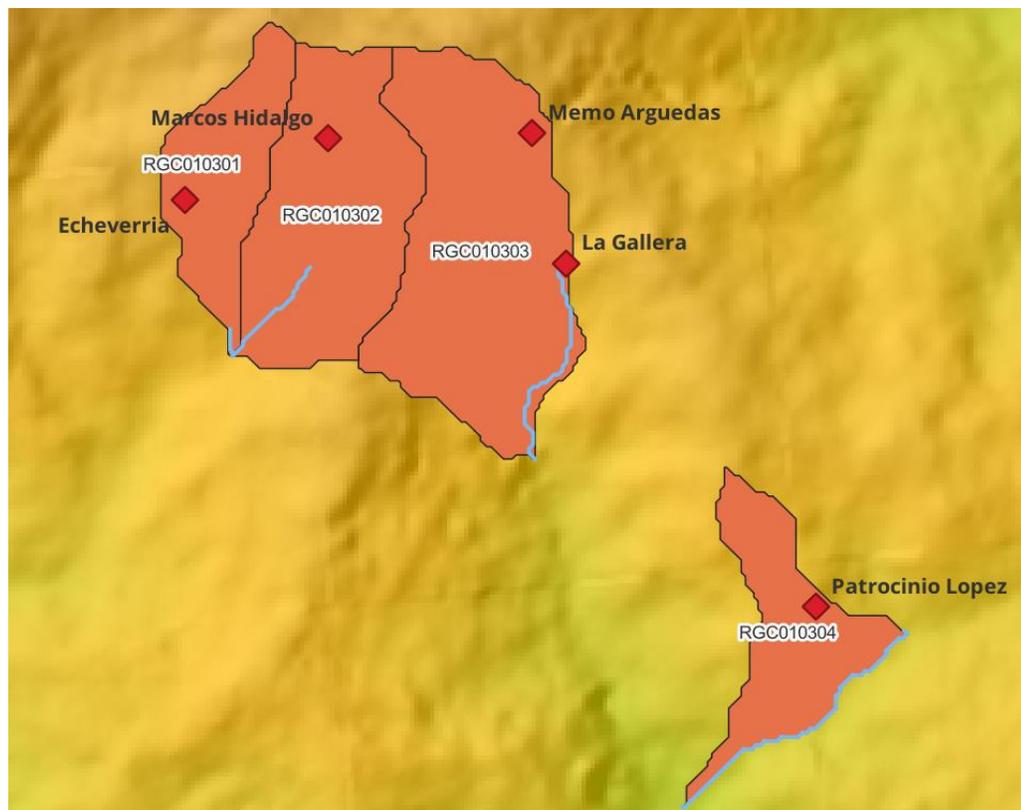
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	COD_CUEN	COD_GG	COD_ASA	COD_MICUEN	COD_FUEN	ID_MICUEN	ID_FUEN	GRUPO_GEO	Nombre	N_fuente
2	RGC	1	3	3	1	RGC010303	RGC01030301	Aserri-Acosta	Tarbaca de Aserri	Memo Arguedas
3	RGC	1	3	1	2	RGC010301	RGC01030102	Aserri-Acosta	Tarbaca de Aserri	Echeverria
4	RGC	1	3	4	3	RGC010304	RGC01030403	Aserri-Acosta	Tarbaca de Aserri	Patrocinio Lopez
5	RGC	1	3	2	4	RGC010302	RGC01030204	Aserri-Acosta	Tarbaca de Aserri	Marcos Hidalgo
6	RGC	1	3	3	5	RGC010303	RGC01030305	Aserri-Acosta	Tarbaca de Aserri	La Gallera

Siendo:

- ✓ COD\_CUEN -> las dos o tres letras de los nombres de los ríos de las grandes cuencas hidrográficas del proyecto, por ejemplo; RV (Río Virilla), RGC (Río Grande de Candelaria), RG (Río Grande), RP (Río Pirrís) y RR (Río Reventazón).

- ✓ COD\_GG -> es la ASADA participante en el proyecto, agrupada de acuerdo con su proximidad territorial y geográfica. El resultado de esta agrupación se presenta como; 01 (Aserri-Acosta), 02 (Puriscal-Mora), 03 (Alajuela-Heredia), 04 (Grecia-Naranjo), 05 (Santos-El Guarco) y 06 (Cartago-Turrialba).
- ✓ COD\_ASA -> un código correlativo numerado de 01 a 60.
- ✓ COD\_MICUEN -> un código correlativo de microcuenca, que varía de 01 hasta la cantidad total de microcuencas que tenga la ASADA.
- ✓ COD\_FUEN -> un código correlativo que identifica las fuentes de captación de agua de la ASADA, numerado en sentido horario a las manecillas del reloj.
- ✓ ID\_MICUEN -> el resultado de la codificación de la o las microcuencas de la ASADA.
- ✓ ID\_FUEN -> el resultado de la codificación de las fuentes de captación de agua de la ASADA.
- ✓ GRUPO\_GEO -> el nombre del grupo territorial o geográfico a la que pertenece la ASADA.
- ✓ Nombre -> es el nombre de registro de la ASADA.
- ✓ N\_fuente -> es el número total o nombre de las fuentes de captación de agua de la ASADA.

microcuencas\_fuentes\_de\_captacion\_agua-> es un archivo de QGIS (QGIS Project) que permite la visualización geoespacial de la o las microcuencas codificadas, sus fuentes de captación de agua y la red de drenaje intermitente, ver figura a continuación. Nota: para desplegar su visualización únicamente deberá instalar QGIS en su versión actual. El software QGIS es totalmente gratuito y puede ser descargado en el siguiente sitio web: <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>



**Figura 5.** Microcuencas con sus fuentes de captación de agua de la ASADA.

Los atributos del Sistema de Información Geográfico (SIG) en el proyecto QGIS (Figura 5), para cada una de la o las microcuencas de la ASADA, se representa en el siguiente cuadro:

	Nombre	ID_MICUEN	AREA_HA	AREA_M2	PERIM_M
1	Tarbacca de Aserrí	RGC010301	20.11	201074.32	2407.23
2	Tarbacca de Aserrí	RGC010303	53.66	536550.10	3566.34
3	Tarbacca de Aserrí	RGC010302	38.87	388669.54	2857.91
4	Tarbacca de Aserrí	RGC010304	21.90	218978.44	2963.95

En esta base de datos de los atributos del SIG podrá encontrar el nombre de la ASADA, el código de la microcuenca, el área en metros cuadrados y hectáreas y el perímetro en metros.

**tomas\_asada\_tarbacca\_aserri**-> es una imagen que permite visualizar la ubicación de las fuentes de captación de agua.

### ***b. Parámetros morfométricos de la o las microcuencas***

Los parámetros morfométricos de la o las microcuencas de la ASADA (ver el o los cuadros), están contenidos en la carpeta **Parámetros\_morfométricos\_ASADA** y describen los índices o coeficientes que sirven de referencia para la categorización de las microcuencas hidrográficas de la ASADA. Además, proporcionan información de base a estudios que intentan conocer más en detalle el funcionamiento hidrológico e hidráulico de una cuenca (Villón 2004; TRAGSA et al. 1998).

**Cuadro 3.** *Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010301) de la ASADA.*

TIPO DE PARÁMETROS	PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Parámetros generales	Área	0.2	Km <sup>2</sup>	Software R, paquete sf
	Perímetro	2.41	Km	Software R, paquete sf
	Clase A	Quebrada	-	Software R
A la forma	Índice de compacidad	1.5	Km	$K = 0,28 \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$ (Gravelius, 1914)
	Clase Kc	Forma oval oblonga a rectangular oblonga	-	$Kc = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{L}$ (Schumm, 1956)
	Lado menor 1 Rect. equivalente	0.45	Km	Software R
	Lado mayor 2 Rect. equivalente	0.76	Km	Software R
	Factor de forma Kf	0.35	Km	Software R
	Clase Kf	Tiende a alargada, baja susceptibilidad a las avenidas	-	Software R
	Índice de alargamiento (Ia)	1.68	Adimensional	Software R
Clase (Ia)	Alargada	-	Software R	

Al relieve	Elevación mín. de la cuenca	1927	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la cuenca	2171.9	m.s.n.m.	Software R (Horton (1932))
	Elevación máx. de la cuenca	2373	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Pendiente media de la cuenca	25.37	%	GIS Analysis/DEM (Rich, 1916; Wentworth's, 1916)
	Clase pendiente	Fuertemente accidentado	-	Software R (RSAGA)
A la red de drenaje (RD)	Orden de drenaje de la cuenca	1	Unid.	Strahler (1952)
	Long. total de las corrientes	0.01	Km	Software R (RSAGA)
	No. de corrientes	1	Unid.	Software R (RSAGA)
	Dens. corrientes	4.97	Unid./Km	Software R (RSAGA)
	Dens. red drenaje	0.06	Km/Km <sup>2</sup>	Software R (RSAGA)
	Long. cauce principal	0.01	Km	Software R (RSAGA)
	Elevación mín. de la RD	1956	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la RD	1958.5	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación máx. de la RD	1961	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Pendiente media de la RD	27.1	%	Software R (RSAGA)
Tiempo de concentración	Tiempo de concentración Kirpich	0	Horas	Método de Kirpich
	Tiempo de concentración Temez	0.01	Horas	Método de Temez
	Tiempo de concentración Giandotti	1.23	Horas	Método de Giandotti
	Tiempo de concentración Passini	0.03	Horas	Método de Passini
	Tiempo de concentración promedio	0.32	Horas	Software R

**Cuadro 4. Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010302) de la ASADA.**

TIPO DE PARÁMETROS	PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Parámetros generales	Área	0.39	Km <sup>2</sup>	Software R, paquete sf
	Perímetro	2.86	Km	Software R, paquete sf
	Clase A	Quebrada	-	Software R
A la forma	Índice de compacidad	1.28	Km	$K = 0,28 \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$ (Gravelius, 1914)
	Clase Kc	Forma oval redonda a oval oblonga	-	$Kc = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{L}$ (Schumm, 1956)
	Lado menor 1 Rect. equivalente	0.62	Km	Software R
	Lado mayor 2 Rect. equivalente	0.81	Km	Software R
	Factor de forma Kf	0.6	Km	Software R

	Clase Kf	Tiende a alargada, baja susceptibilidad a las avenidas	-	Software R
	Índice de alargamiento (Ia)	1.29	Adimensional	Software R
	Clase (Ia)	Alargada	-	Software R
Al relieve	Elevación mín. de la cuenca	1928	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la cuenca	2147.1	m.s.n.m.	Software R (Horton (1932))
	Elevación máx. de la cuenca	2355	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Pendiente media de la cuenca	26.67	%	GIS Analysis/DEM (Rich, 1916; Wentworth's, 1916)
	Clase pendiente	Fuertemente accidentado	-	Software R (RSAGA)
A la red de drenaje (RD)	Orden de drenaje de la cuenca	2	Unid.	Strahler (1952)
	Long. total de las corrientes	0.51	Km	Software R (RSAGA)
	No. de corrientes	3	Unid.	Software R (RSAGA)
	Dens. corrientes	7.72	Unid./Km	Software R (RSAGA)
	Dens. red drenaje	1.3	Km/Km <sup>2</sup>	Software R (RSAGA)
	Long. cauce principal	0.15	Km	Software R (RSAGA)
	Elevación mín. de la RD	1939	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la RD	1967.1	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación máx. de la RD	1994	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Pendiente media de la RD	21.5	%	Software R (RSAGA)
Tiempo de concentración	Tiempo de concentración Kirpich	0.03	Horas	Método de Kirpich
	Tiempo de concentración Temez	0.1	Horas	Método de Temez
	Tiempo de concentración Giandotti	0.59	Horas	Método de Giandotti
	Tiempo de concentración Passini	0.09	Horas	Método de Passini
	Tiempo de concentración promedio	0.2	Horas	Software R

**Cuadro 5. Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010303) de la ASADA.**

TIPO DE PARÁMETROS	PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Parámetros generales	Área	0.54	Km <sup>2</sup>	Software R, paquete sf
	Perímetro	3.57	Km	Software R, paquete sf
	Clase A	Quebrada	-	Software R
A la forma	Índice de compacidad	1.36	Km	$K = 0,28 \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right)$ (Gravelius, 1914)

	Clase Kc	Forma oval redonda a oval oblonga	-	$Kc = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{I}$ (Schumm, 1956)
	Lado menor 1 Rect. equivalente	0.73	Km	Software R
	Lado mayor 2 Rect. equivalente	1.05	Km	Software R
	Factor de forma Kf	0.49	Km	Software R
	Clase Kf	Tiende a alargada, baja susceptibilidad a las avenidas	-	Software R
	Índice de alargamiento (Ia)	1.43	Adimensional	Software R
	Clase (Ia)	Alargada	-	Software R
Al relieve	Elevación mín. de la cuenca	1836	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la cuenca	2091.9	m.s.n.m.	Software R (Horton 1932)
	Elevación máx. de la cuenca	2338	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Pendiente media de la cuenca	26.1	%	GIS Analysis/DEM (Rich, 1916; Wentworth's, 1916)
	Clase pendiente	Fuertemente accidentado	-	Software R (RSAGA)
A la red de drenaje (RD)	Orden de drenaje de la cuenca	1	Unid.	Strahler (1952)
	Long. total de las corrientes	0.82	Km	Software R (RSAGA)
	No. de corrientes	2	Unid.	Software R (RSAGA)
	Dens. corrientes	3.73	Unid./Km	Software R (RSAGA)
	Dens. red drenaje	1.53	Km/Km <sup>2</sup>	Software R (RSAGA)
	Long. cauce principal	0.82	Km	Software R (RSAGA)
	Elevación mín. de la RD	1850	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la RD	2009.5	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación máx. de la RD	2151	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
Pendiente media de la RD	20.2	%	Software R (RSAGA)	
Tiempo de concentración	Tiempo de concentración Kirpich	0.11	Horas	Método de Kirpich
	Tiempo de concentración Temez	0.35	Horas	Método de Temez
	Tiempo de concentración Giandotti	0.4	Horas	Método de Giandotti
	Tiempo de concentración Passini	0.18	Horas	Método de Passini
	Tiempo de concentración promedio	0.26	Horas	Software R

**Cuadro 6. Parámetros morfométricos de la microcuenca (RGC010304) de la ASADA.**

TIPO DE PARÁMETROS	PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Parámetros generales	Área	0.22	Km <sup>2</sup>	Software R, paquete sf
	Perímetro	2.96	Km	Software R, paquete sf
	Clase A	Quebrada	-	Software R
A la forma	Índice de compacidad	1.77	Km	$K = 0,28 \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right)$ (Gravelius, 1914)
	Clase Kc	Forma rectangular oblonga	-	$Kc = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{L}$ (Schumm, 1956)
	Lado menor 1 Rect. equivalente	0.47	Km	Software R
	Lado mayor 2 Rect. equivalente	1.01	Km	Software R
	Factor de forma Kf	0.21	Km	Software R
	Clase Kf	Tiende a alargada, baja susceptibilidad a las avenidas	-	Software R
	Índice de alargamiento (Ia)	2.17	Adimensional	Software R
Al relieve	Clase (Ia)	Alargada	-	Software R
	Elevación mín. de la cuenca	1589	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la cuenca	1819	m.s.n.m.	Software R (Horton 1932)
	Elevación máx. de la cuenca	1991	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Pendiente media de la cuenca	22.99	%	GIS Analysis/DEM (Rich, 1916; Wentworth's, 1916)
A la red de drenaje (RD)	Clase pendiente	Fuertemente accidentado	-	Software R (RSAGA)
	Orden de drenaje de la cuenca	NA	Unid.	Strahler (1952)
	Long. total de las corrientes	NA	Km	Software R (RSAGA)
	No. de corrientes	NA	Unid.	Software R (RSAGA)
	Dens. corrientes	NA	Unid./Km	Software R (RSAGA)
	Dens. red drenaje	NA	Km/Km <sup>2</sup>	Software R (RSAGA)
	Long. cauce principal	NA	Km	Software R (RSAGA)
	Elevación mín. de la RD	NA	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación media de la RD	NA	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
	Elevación máx. de la RD	NA	m.s.n.m.	Software R (RSAGA)
Tiempo de concentración	Pendiente media de la RD	NA	%	Software R (RSAGA)
	Tiempo de concentración Kirpich	NA	Horas	Método de Kirpich
	Tiempo de concentración Temez	NA	Horas	Método de Temez
	Tiempo de concentración Giandotti	NA	Horas	Método de Giandotti



**c. Uso y cobertura de la o las microcuencas de la ASADA**

En la carpeta **Uso\_cobertura\_microcuencas\_ASADA** se alojan los datos del archivo vectorial (.shp) de uso y cobertura la o las microcuencas de la ASADA, las imágenes y gráficos, y las hojas Excel con sus respectivos cálculos, ver imágenes de uso y cobertura por microcuencas:



**5.2 RESULTADO: BASE DE DATOS, MAPAS Y GRÁFICOS DEL ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO**

**a. Base de datos del clima de la serie actual (o serie histórica)**

Este apartado, describe la organización de la base de datos del estudio hidrometeorológico o estudio del clima histórico (series de precipitación y temperatura) del periodo 1990 al 2014 y 2020, que concierne a los datos de WorldClim evaluados y corregidos con datos de 22 estaciones meteorológicas del IMN<sup>7</sup> y clima futuro 2021 al 2040:

En la carpeta **c) Base de datos hidrometeorológica histórica y futura**, encontrará la siguiente carpeta:

<p><b>Serie actual - historica</b> -&gt; carpeta que contiene la siguiente información:</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Ensamble_serie_hist</b></li> <li><b>Hist_Final</b></li> </ul> <p>Donde:</p>

La carpeta **Ensamble\_serie\_hist** -> aloja la base de datos historia de WorldClim (Harris et al., 2020) ensamblada o ajustada a 1 km<sup>2</sup> para la variable precipitación (pr), temperatura máxima (tmax) y mínima (tmin) en formato tipo netCDF (.nc) desde 1990 al 2020. Es el proceso ensamblado y no tiene el análisis de correlación y de sesgo con los datos de las estaciones meteorológicas del IMN.

<sup>7</sup> Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.

<p>Datos contenido en la carpeta:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> final_pcp_hist</li> <li> final_tmax_hist</li> <li> final_tmin_hist</li> <li> Newpr_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmax_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmin_resampled_hist.nc</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> final_pcp_hist</li> <li> final_tmax_hist</li> <li> final_tmin_hist -&gt; son imágenes de localización del área de estudio del proyecto con las 60 ASADAS participantes. Estas imágenes muestran el promedio anual de la precipitación y temperaturas máximas y mínimas de los datos de WorldClim ensamblados a 1 km<sup>2</sup>.</li> <li> Newpr_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmax_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmin_resampled_hist.nc -&gt; son archivos en formato .nc que contienen las series histórica de datos de 1990 al 2020 en WorldClim debidamente ensamblados a 1 km<sup>2</sup>. Cada uno de             <ul style="list-style-type: none"> <li> Newpr_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmax_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmin_resampled_hist.nc</li> </ul>             tiene 327 datos, distribuidos de la siguiente manera; 12 datos por año (1990=12 datos referido a los meses, 1991=12 datos...), donde X1 corresponde al dato de enero de 1990..., y X372 = al dato de diciembre del 2020. En seguido, se muestra la estructura del archivo ráster para enero de 1990 y diciembre de 2020.           </li> </ul>
<p>Estructura en formato ráster de los archivos .nc:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Newpr_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmax_resampled_hist.nc</li> <li> Newtmin_resampled_hist.nc</li> </ul> <p>&gt; para las series historicas de 1990 al 2020.</p>	<p>Visualización de la estructura ráster del archivo precipitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Newpr_resampled_hist.nc</li> </ul> <p><b>Enero de 1990 (band 1, names X1):</b></p> <pre>band      : 1 (of 372 bands) dimensions : 79, 116, 9164 (nrow, ncol, ncell) resolution : 0.008333333, 0.008333333 (x, y) extent    : -84.51667, -83.55, 9.541667, 10.2 (xmin, xmax, ymin, ymax) crs       : +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs source    : Newpr_resampled_hist.nc names     : X1 values    : 6.24, 425.2 (min, max) months of 1990-2020: 1 zvar      : precipitation</pre> <p><b>Diciembre de 2020 (band 372, names X372):</b></p> <pre>band      : 372 (of 372 bands) dimensions : 79, 116, 9164 (nrow, ncol, ncell) resolution : 0.008333333, 0.008333333 (x, y) extent    : -84.51667, -83.55, 9.541667, 10.2 (xmin, xmax, ymin, ymax) crs       : +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs source    : Newpr_resampled_hist.nc names     : X372 values    : 6.24, 425.2 (min, max) months of 1990-2020: 372 zvar      : precipitation</pre>

```

# Código en R para una lectura rápida de la estructura de los archivos .nc:
library(ncdf4)
library(raster)

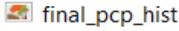
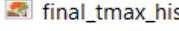
setwd("directorio de su carpeta de trabajo")

Newpr_resampled_hist <- nc_open("./Newpr_resampled_hist.nc")

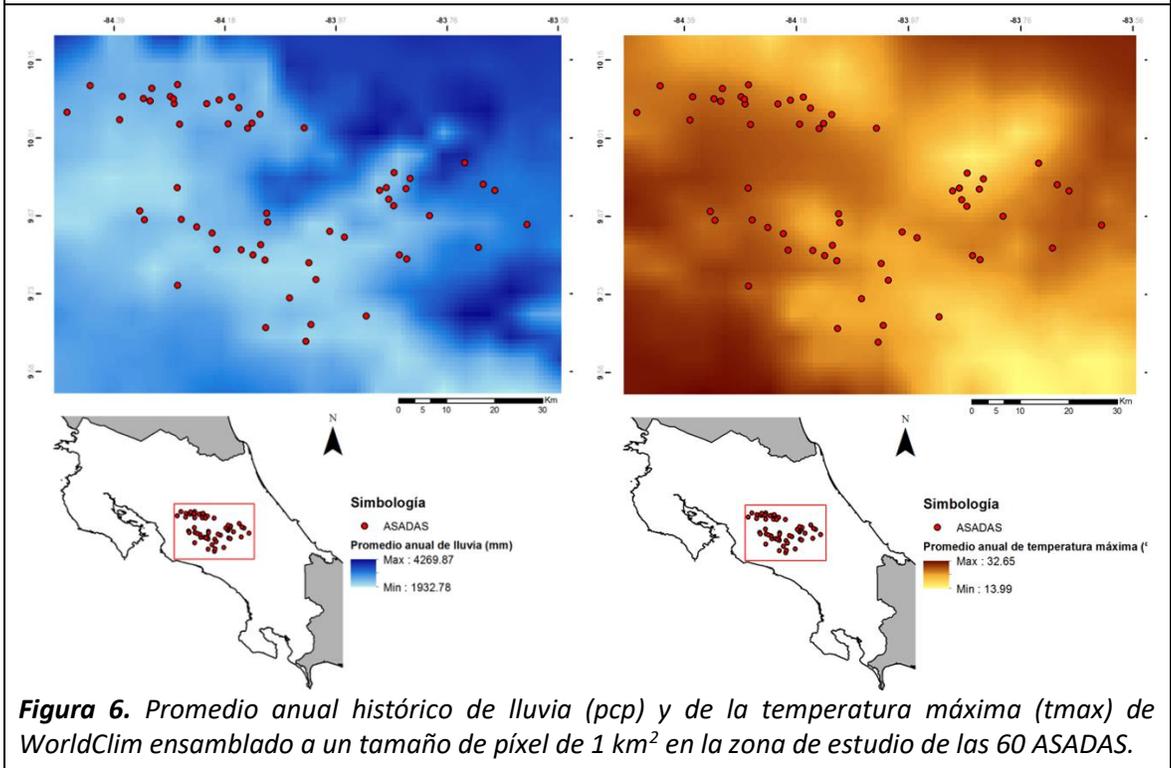
names(Newpr_resampled_hist$var)

net1 <- stack("./Newpr_resampled_hist.nc", varname = "precipitation")

net1[[1]] # lectura de la estructura del archivo que contiene los datos de enero de 1990 para
precipitación.
net1[[372]] # lectura de la estructura del archivo que contiene los datos de diciembre del 2020
para precipitación.
    
```

 final\_pcp\_hist  
 final\_tmax\_hist

Ejemplo visual de los archivos: . Son dos mapas ilustrativos que tiene como objetivo exponer de manera práctica los datos ajustado o ensamblado a 1 km<sup>2</sup> de WorldClim para la variable de lluvia (precipitación) y de temperatura máxima, en promedio anual, ver imágenes a continuación:

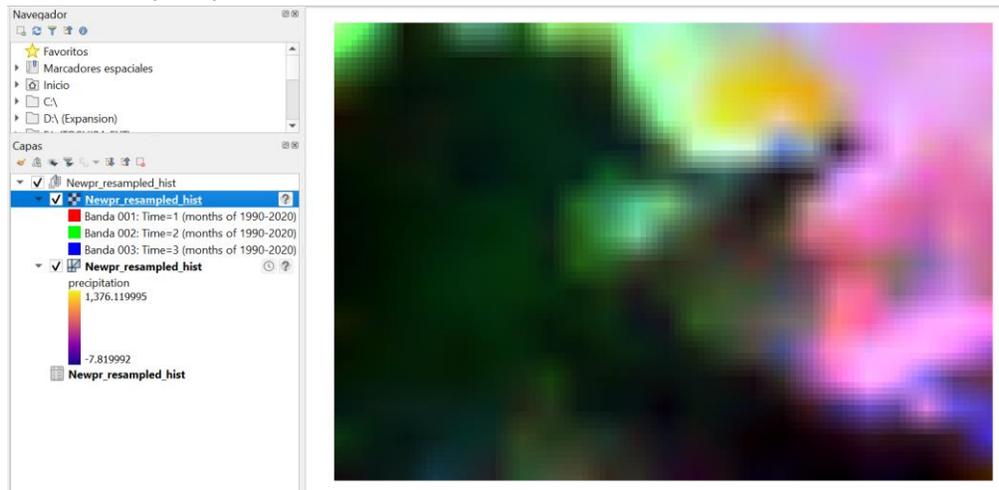


Ejemplo visual en el software QGIS del archivo:  Newpr\_resampled\_hist.nc ,

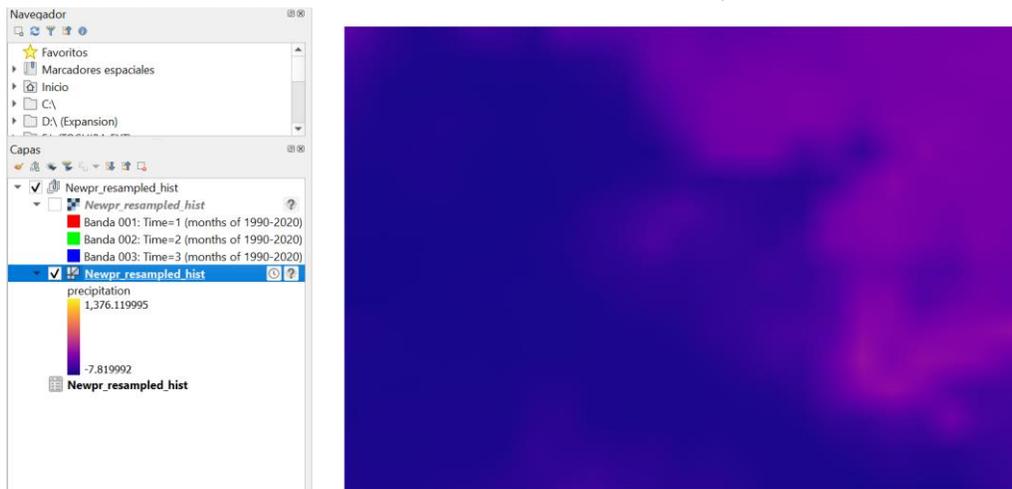
Newtmax\_resampled\_hist.nc

Esta visualización se repite para los demás archivos  Newtmin\_resampled\_hist.nc de temperatura máxima y mínima.

Archivo ráster de precipitación de WorldClim – ensamblados a 1 km<sup>2</sup> con datos de 1990 al 2020.



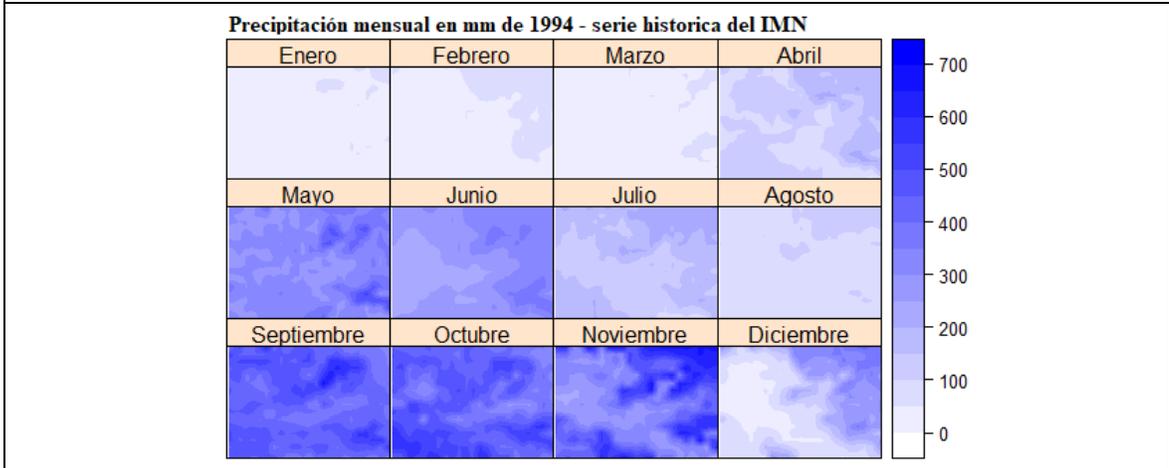
Es lo mismo. Archivo ráster de precipitación de WorldClim – ensamblados a 1 km<sup>2</sup> con datos de 1990 al 2020. La idea es observar como usted lo visualizaría en QGIS.



Esta carpeta **Hist\_Final** -> aloja la base de datos de la serie histórica de 1990 al 2014 de WorldClim, como producto final del análisis de correlaciones y de sesgos realizado con los datos de las 22 estaciones meteorológicas del IMN, proceso que fue detallado en el apartado de metodología.

<p>Datos contenido en la carpeta:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> leer_los_datos_CLIMA</li> <li> pcp histórico (precipitación mensual de 1994)</li> <li> pcp_hist_corrected.nc</li> <li> Tmax_Fin.nc</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> leer_los_datos_CLIMA -&gt; código en R que permite leer los archivos .nc, procesarlos y visualizarlos.</li> <li> pcp histórico (precipitación mensual de 1994) -&gt; es un ejemplo visual de los datos mensuales de 1994 contenidos en el archivo  pcp_hist_corrected.nc aplicando el código R arriba mencionado.</li> <li> pcp_hist_corrected.nc -&gt; es el archivo en formato .nc que contiene las series histórica de datos de 1990 al 2014 en WorldClim debidamente ensamblados a 1 km<sup>2</sup> y corregido con datos de las 22 estaciones meteorológicas del IMN. Este archivo tiene 300 datos, donde cada año tiene 12 datos referido a los meses del año, por ejemplo; 1990=12 datos, 1991=12 datos..., para un total de 25 años de datos.</li> <li> Tmax_Fin.nc -&gt; igual que la anterior, solo que corresponde a los datos de la variable temperatura máxima.</li> </ul>
---	---

Se realizó un ejemplo de visualización de la aplicación del código R leer\_los\_datos\_CLIMA para el archivo pcp\_hist\_corrected.nc . El presente archivo pcp histórico (precipitación mensual de 1994) es el resultado de la aplicación de código R, ver figura a continuación:



<p>Estructura ráster de los archivos .nc:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> pcp_hist_corrected.nc</li> <li> Tmax_Fin.nc</li> </ul>	<p>Visualización de la estructura del archivo precipitación:</p> <p> pcp_hist_corrected.nc</p> <p><b>Enero de 1990 (band 1, names X1):</b></p> <pre> band      : 1 (of 300 bands) dimensions : 79, 116, 9164 (nrow, ncol, ncell) resolution : 0.008333333, 0.008333333 (x, y) extent    : -84.51667, -83.55, 9.541667, 10.2 (xmin, xmax, ymin, ymax) crs       : +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs source    : pcp_hist_corrected.nc names     : X1 values    : 6.24, 425.2 (min, max) zvar      : z (unknown)                     </pre>
--	---

	<p>Visualización de la estructura del archivo temperatura máxima:  Tmax_Fin.nc</p> <p><i>Enero de 1990 (band 1, names X1):</i></p> <pre> band      : 1 (of 300 bands) dimensions : 79, 116, 9164 (nrow, ncol, ncell) resolution : 0.008333333, 0.008333333 (x, y) extent    : -84.51667, -83.55, 9.541667, 10.2 (xmin, xmax, ymin, ymax) crs       : +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs source    : Tmax_Fin.nc names     : X1 values    : 21.91181, 29.50362 (min, max) zvar      : variable                     </pre>
--	---

**b. Base de datos del clima de las series futuras para cada escenario y momento temporal**

La base de datos de las series futuras contiene las variables de precipitación, temperatura máximas y mínimas del 2021 al 2040 para los modelos climáticos más recientes (CMIP6 por siglas en inglés) con emisiones optimistas (SSP 2.6) y pesimistas (SSP 8.5) ensamblado a un tamaño de píxel de 1 km<sup>2</sup>.

Descripción de la organización de la base de datos del clima futuro (precipitación y temperatura) para el periodo comprendido entre el 2021 al 2040:

En la carpeta c) Base de datos hidrometeorológica histórica y futura , encontrará la siguiente carpeta:

<p> Serie futura - SSP -&gt; carpeta que contiene la siguiente información:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> netcdf_future</li> <li> Series P y T netcdf</li> </ul>
--

<p>La carpeta  netcdf_future -&gt; contiene dos carpetas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> MIROC6_ssp126</li> <li> MIROC6_ssp585</li> </ul>
--

**MIROC6\_ssp126** -> aloja la base de datos de los modelos climáticos CMIP6 ensamblados al tamaño de 1 km<sup>2</sup> de píxel para las emisiones optimistas (SSP 2.6) de la variable precipitación (pr\_), temperatura máxima (tmpMax) y mínima (tmpMin) en formato netCDF (.nc). Ver los archivos a continuación:

- Newpr\_MIROC6\_ssp126.nc
- NewtmpMax\_MIROC6\_ssp126.nc
- NewtmpMin\_MIROC6\_ssp126.nc

Cada uno de los archivos tiene 240 datos, donde cada año tiene 12 datos referido a los meses del año, por ejemplo; 2021=12 datos, 2022=12 datos..., para un total de 20 años de datos.

La estructura ráster de los archivos. Como ejemplo, se muestra a continuación la estructura ráster del archivo precipitación de enero del 2021 Newpr\_MIROC6\_ssp126.nc

*Enero de 2021 (band 1, names X1):*

```
band      : 1 (of 240 bands)
dimensions : 79, 116, 9164 (nrow, ncol, ncell)
resolution : 0.008333333, 0.008333333 (x, y)
extent     : -84.51667, -83.55, 9.541667, 10.2 (xmin, xmax, ymin, ymax)
crs        : +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs
source     : Newpr_MIROC6_ssp126.nc
names      : X1
values     : 1.593423, 43.81829 (min, max)
zvar       : precipitation
```

Nota: esta estructura ráster es igual a los archivos de temperatura máxima y mínima que se muestran a continuación:

- NewtmpMax\_MIROC6\_ssp126.nc
- NewtmpMin\_MIROC6\_ssp126.nc

**MIROC6\_ssp585** -> aloja la base de datos de los modelos climáticos CMIP6 ensamblados al tamaño de 1 km<sup>2</sup> de píxel para las emisiones pesimistas (SSP 8.5) de la variable precipitación (pr\_), temperatura máxima (tmpMax) y mínima (tmpMin) en formato netCDF (.nc). Ver los archivos a continuación:

- Newpr\_MIROC6\_ssp585.nc
- NewtmpMax\_MIROC6\_ssp585.nc
- NewtmpMin\_MIROC6\_ssp585.nc

Nota: cada uno de los archivos contiene la misma cantidad de datos (240) e igual estructura de ráster que las emisiones optimista (SSP 2.6) explicado en el párrafo anterior.

La carpeta **Series P y T netcdf** -> contiene dos carpetas:

- 2.6\_Futuro Final
- 8.5\_Futuro Final

2.6\_Futuro Final -> aloja la base de datos de los modelos climáticos CMIP6 ensamblada al tamaño de píxel de 1 km<sup>2</sup> y corregida por correlaciones y sesgos para las emisiones optimistas (SSP 2.6) de la variable precipitación (Pcp), temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) en formato netCDF (.nc). Ver archivos a continuación:

- PcpFut2.6\_Fin.nc
- TmaxFut2.6\_Fin.nc
- TminFut2.6\_Fin.nc

Nota: al igual que la anterior cada archivo contiene 240 datos del periodo 2021 al 2024 y tiene igual estructura de ráster. Se sugiere utilizar estos datos, en caso de que requiera hacer una comparación estadística con las series históricas o bien para estudios que incluyan escenarios futuros.

8.5\_Futuro Final -> aloja la base de datos de los modelos climáticos CMIP6 ensamblada al tamaño de píxel de 1 km<sup>2</sup> y corregida por correlaciones y sesgos para las emisiones pesimistas (SSP 8.5) de la variable precipitación (Pcp), temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) en formato netCDF (.nc). Ver archivos a continuación:

- PcpFut8.5\_Fin.nc
- TmaxFut8.5\_Fin.nc
- TminFut8.5\_Fin.nc

Nota: tiene 240 datos (2021 al 2024) y la misma estructura ráster mostrada en los párrafos anteriores.

### c. Comparación del clima histórico con los escenarios futuros

En este estudio, se procedió a comparar estadísticamente los resultados de las series mensuales de 1990 a 2014 (serie histórica corregidas) con base en la climatología de WorldClim, que incluye las variables de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima ensamblados a una resolución de 1 km<sup>2</sup>. Esta base fue corregida por correlaciones y sesgos utilizando datos verificados del IMN. También se utilizaron las series futuras de ambos escenarios, las cuales fueron ensambladas y corregidas. Todo esto proceso realizado fue con el objetivo de comparar las series históricas de 1990 al 2014 con la serie futura del período 2021 al 2040 para los escenarios de emisiones optimistas (SSP 2.6) y, como contraste, las emisiones pesimistas (SSP 8.5), para así poder identificar posibles cambios.

Los siguientes cuadros muestra la comparación de los datos de las series históricas versus las futuras para las tres variables estudiadas:

#### Variable precipitación (PCP):

ASADA	PCP historico 1990-2014				PCP SSP 2.6 2021-2040				PCP SSP 8.5 2021-2040			
	Min	Max	Media	Promedio	Min	Max	Media	Promedio	Min	Max	Media	Promedio
00891-2014_TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE	5.9	667.6	193.9	191.2	2.5	1899.1	212.7	247.1	5.5	865.1	184.3	208.2

**Variable temperatura máxima (Tmax):**

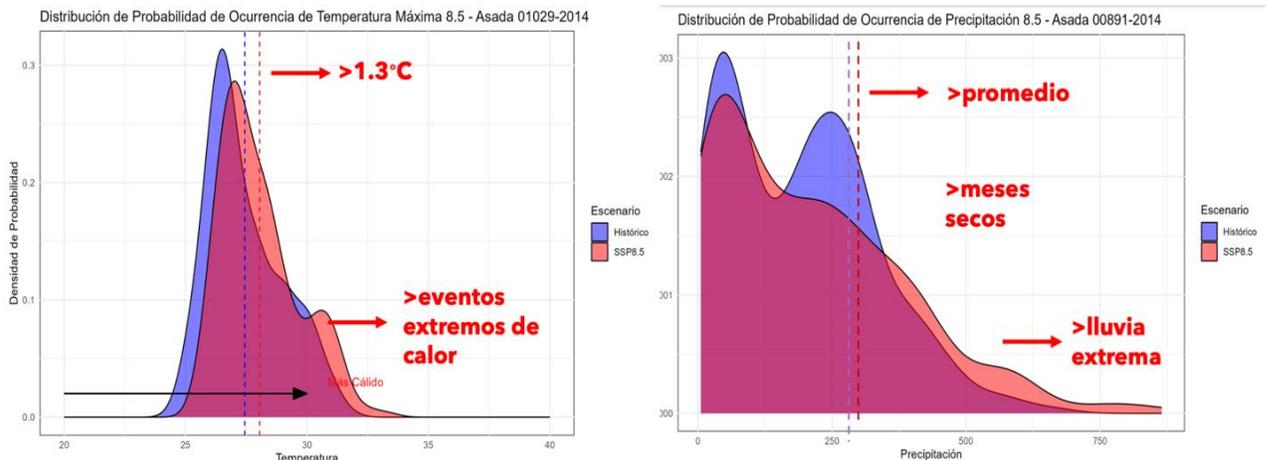
ASADA	Historico Tmax 1990-2014				SSP 2.6 Tmax 2021-2040				SSP 8.5 Tmax 2021-2040			
	Min	Max	Media	Promedio	Min	Max	Media	Promedio	Min	Max	Media	Promedio
00891-2014_TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE	23.4	30.2	25.6	26.0	23.7	30.8	25.9	26.3	24.3	31.5	26.2	26.6

**Variable temperatura mínima (Tmin):**

ASADA	Historico Tmin 1990-2014				SSP 2.6 Tmin 2021-2040				SSP 8.5 Tmin 2021-2040			
	Min	Max	Media	Promedio	Min	Max	Media	Promedio	Min	Max	Media	Promedio
00891-2014_TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE	19.0	22.6	21.1	21.0	19.2	23.9	21.3	21.2	19.5	24.0	21.5	21.4

En seguida, se visualizan los datos de temperatura y precipitación a futuro del escenario pesimista (SSP 8.5) con un calentamiento proyectado para el 2099 de 8.5 °C. Las figuras muestran la distribución de los datos comparando el histórico (azul) con el escenario futuro (rojo) permitiendo deducir los posibles cambios:

- El aumento de temperatura se proyecta para el 2040 en 1.3 °C con mayor frecuencia de eventos extremos de calor.
- El promedio de lluvia se proyecta a aumentar ligeramente (17 mm) con mayor frecuencia de meses secos y meses húmedos.



**Figura 7.** Gráficos de comparación del histórico (azul) con el escenario futuro (rojo) de las variables temperatura máxima y precipitación de la ASADA.

Su base de datos está contenida en la carpeta **c) Base de datos hidrometeorológica histórica y futura**, y en ella encontrará la carpeta llamada:

**Comparacion\_clima historico y futuro (SSP)** - > carpeta que contiene la siguiente información:

<p>Datos contenido en la carpeta:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> prob_graficos_hist SSP</li> <li> estadisticas_PCP hist SSPs</li> <li> estadisticas_Tmax hist SSPs</li> <li> estadisticas_Tmin hist SSPs</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> prob_graficos_hist SSP -&gt; contiene los gráficos de distribución de probabilidades de ocurrencia para las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de los escenarios optimistas 2.6 y pesimistas 8.5, y los gráficos (boxplot) de comparaciones y de correlaciones, ver carpetas e imágenes de comparación y correlaciones:</li> <li> PCP2.6</li> <li> PCP8.5</li> <li> Tmax2.6</li> <li> Tmax8.5</li> <li> Tmin2.6</li> <li> Comparacion_boxplot_sin NA</li> <li> correlaciones</li> <li> estadisticas_PCP hist SSPs</li> <li> estadisticas_Tmax hist SSPs</li> <li> estadisticas_Tmin hist SSPs -&gt; son archivos en formato Excel que contienen los valores de comparación estadística (min, max, mediana, promedio, etc.) de la serie histórica versus la serie futura para las tres variables climáticas (precipitación y temperatura máxima y mínima).</li> </ul>
--	--

**d. Balance climático (BC) e Índice de Aridez (IA) mensual histórico y futuro**

Se describen los resultados de cambios temporales en los índices hidrometeorológicos estudiado: balance climático (BC) e índice de aridez (IA):

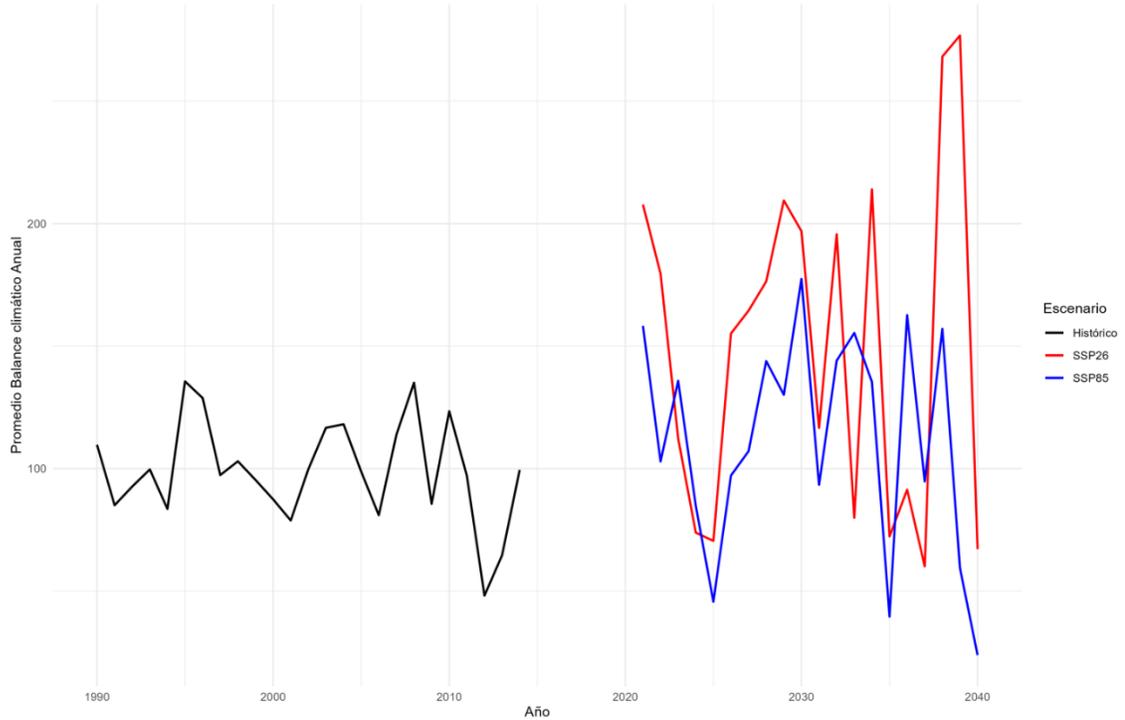
La siguiente visualización del BC promedio anual en forma de serie de tiempo histórica versus escenarios futuros permite valorar posibles cambios en cuanto a mayor o menor variabilidad climática. El BC al igual que el IA ilustran futuros cambios en aridez de la ASADA.

Ambos índices indican un posible cambio del promedio (histórico 106 mm/mes a 120 mm/mes del SSP 8.5) y de la varianza a futuro bajo los dos escenarios. Asimismo, los índices muestran la posibilidad de una mayor variabilidad climática a futuro. Los percentiles 10 y 90 del BC histórico se ubican entre -76 y 311 mm/mes y cambiarían con el SSP 8.5 a -83 y 356 mm/mes confirmando una mayor variabilidad climática.

El BC promedio anual seguirá probablemente positivo, pero con más extremos secos y húmedos que representa un desafío para el manejo del recurso hídrico en la ASADA. Eventos secos extremos pueden aumentar al igual que para el IA. El IA generalmente apuntará a una mayor aridez a futuro.

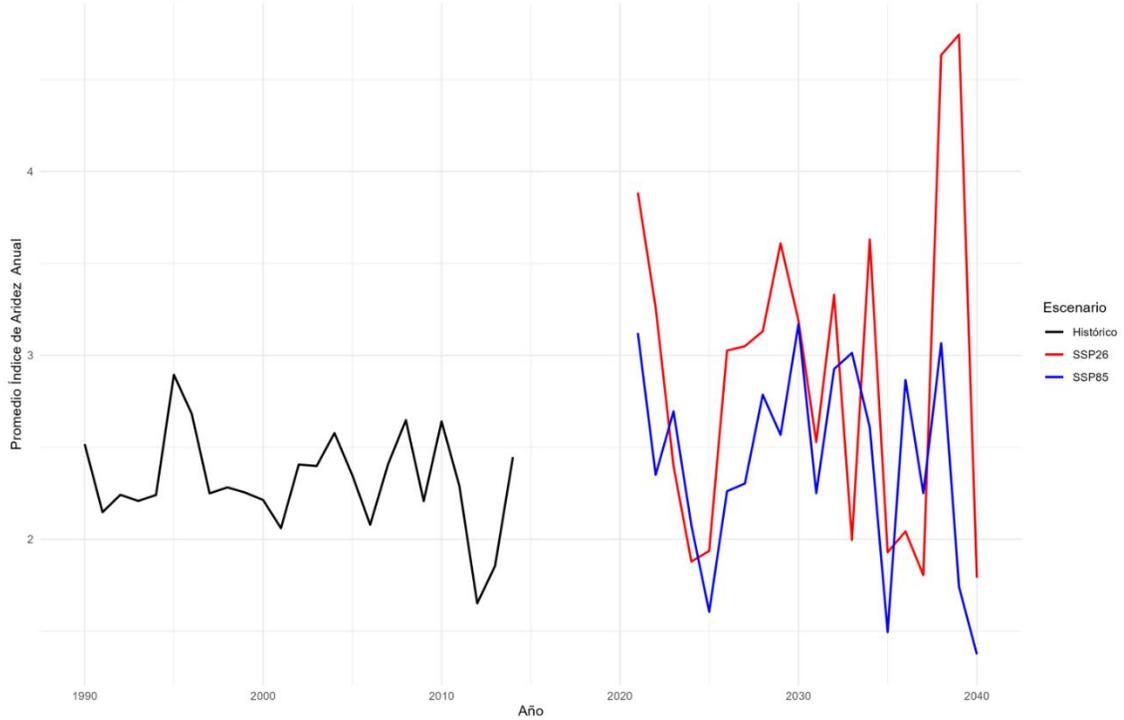
Ver figuras del BC y AI a continuación:

Balance climático (1990-2040) - ASADA TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE



**Figura 8.** Cambios temporales del balance climático (BC) histórico (negro) y futuro (rojo = SSP 2.6 y azul = SSP 8.5) de la ASADA.

Índice de Aridez (1990-2040) - ASADA TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE



**Figura 9.** Cambios temporales del índice de aridez (IA) histórico (negro) y futuro (rojo = SSP 2.6 y azul = SSP 8.5) de la ASADA.

En ambos casos (BC y IA) habrá una mayor variabilidad climática a futuro. Las estadísticas descriptivas del BC y IA se muestra en los siguientes cuadros.

**Cuadro 7. Estadísticas descriptivas (Min, Max, mediana-P50, promedio - avg, y los percentiles 10 y 90) de los índices BC y IA.**

**Balance climático (BC):**

ASADA	1990-2014						SSP2.6 2021-2040						SSP8.5 2021-2040					
	Min	Max	Mediana	Promedio	P10	P90	Min	Max	Mediana	Promedio	P10	P90	Min	Max	Mediana	Promedio	P10	P90
TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE	-102.86	591.17	111.68	105.76	-75.49	310.97	-109.85	1041.88	134.74	157.76	-75.15	451.60	-105.02	762.79	93.57	120.16	-83.16	356.30

**Índice de aridez (IA):**

ASADA	1990-2014						SSP2.6 2021-2040						SSP8.5 2021-2040					
	Min	Max	Mediana	Promedio	P10	P90	Min	Max	Mediana	Promedio	P10	P90	Min	Max	Mediana	Promedio	P10	P90
TARBACA DE ASERRI, SAN JOSE	0.06	8.73	2.43	2.43	0.24	5.04	0.02	13.48	2.63	3.04	0.25	6.77	0.05	11.33	2.04	2.56	0.17	5.57

La base de datos está contenida en la carpeta **c) Base de datos hidrometeorológica histórica y futura**, y en ella encontrará la siguiente carpeta:

**Estudio\_hidrometeorologico** -> carpeta que contiene otra carpeta llamada:

**BC\_IA**-> en ella encontrará la siguiente información:

Datos contenido en la carpeta:

- Balance climatico
- Indice aridez
- PET
- estadisticas\_BC hist vs fut
- estadisticas\_IA hist vs fut

Descripción de los archivos:

- Balance climatico
- Indice aridez -> las carpetas alojan la base de datos del BC y IA para toda la zona del proyecto, en formato netCDF (.nc). Sus archivos son:
  - BC\_fut26\_fil.nc
  - BC\_fut85\_fil.nc
  - BC\_hist.nc
  - ari\_fut26\_fil.nc
  - ari\_fut85\_fil.nc
  - ari\_hist.nc

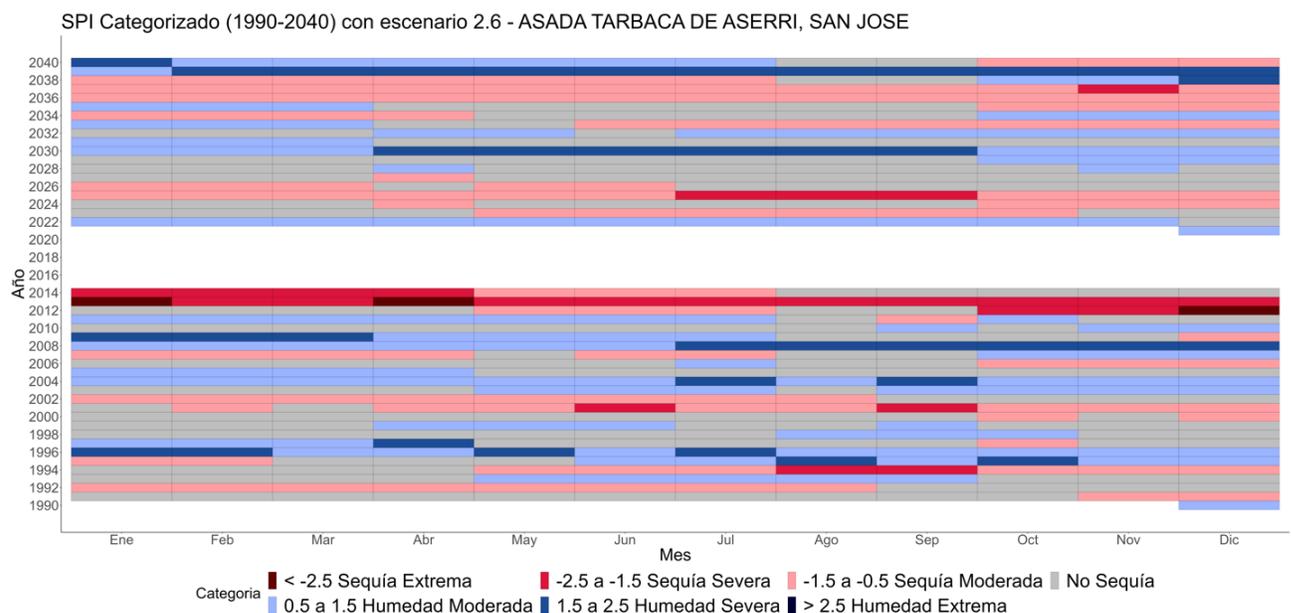
Nota: los archivos BC\_fut26\_fil.nc BC\_fut85\_fil.nc tienen 240 datos (de 2021 al 204) con la misma lógica del ordenamiento de los años y la misma estructura ráster mostrada anteriormente. El archivo BC\_hist.nc tiene 300 datos (de 1990 al 2014) con la misma estructura ráster.

- PET -> archivos en formato .nc que contienen la información de la evapotranspiración potencial histórica y futura de la zona de estudio del proyecto. El ordenamiento de los datos y la estructura ráster es igual a lo descrito anteriormente.
- estadisticas\_BC hist vs fut
- estadisticas\_IA hist vs fut -> son dos archivos en formato Excel que compara mediante estadística descriptiva (min, max, mediana, promedio) la serie histórica y la serie futura del BC y el IA.

**e. Análisis de extremos históricos y futuros (déficit y superávit de agua) a través del índice estandarizada de precipitación (SPI)**

El SPI en este apartado, se ilustra en formato de un mapa de calor (ver figuras a continuación) con las categorías de no sequía hasta sequía extrema (rojo oscuro) y del otro lado a húmedo extremo (azul oscuro) por mes y año comparando el periodo histórico con el futuro por escenario.

Para esta ASADA se registró en los datos históricos un evento extremo seco, pero sin evento extremo húmedo usando esta clasificación SPI en el estudio. Los eventos extremos se ausentan a futuro a costo de un aumento en la frecuencia de los eventos severos secos y húmedos. Sin embargo, se indica al igual que en el caso del BC y IA una mayor variabilidad climática a futuro. Se proyectan más extremos secos y húmedos a futuro con una mayor duración, frecuencia y severidad. Estas estadísticas agregan en la base de datos en formato de tabla (.csv).



**Figura 10.** SPI categorizado para los datos históricos (1990 al 2014) y futuros (2021 al 2040) con escenario optimistas (SSP 2.6).



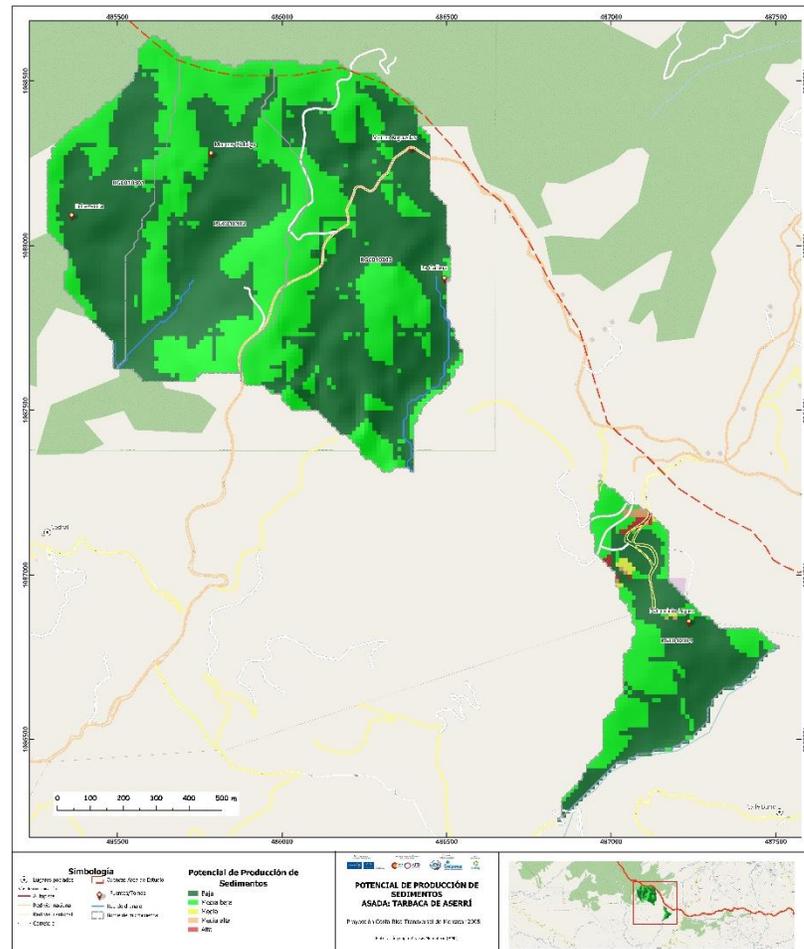
**Figura 11.** SPI categorizado para los datos históricos (1990 al 2014) y futuros (2021 al 2040) con escenario pesimistas (SSP 8.5).

Su base de datos está contenida en la carpeta **c) Base de datos hidrometeorológica histórica y futura**, y en ella encontrará la siguiente carpeta:

<p><b>Estudio_hidrometeorologico</b> -&gt; carpeta que contiene otra carpeta llamada:</p>	
<p><b>Sequia_meteorologica-SPI</b> -&gt; en ella encontrará la siguiente información:</p>	
<p>Datos contenido en la carpeta:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> 2.6_fut</li> <li> 8.5_fut</li> <li> Eventos_Sequia_fut2.6</li> <li> Eventos_Sequia_fut8.5</li> <li> Eventos_Sequia_hist1</li> <li> Eventos_superavit_fut2.6</li> <li> Eventos_superavit_fut8.5</li> <li> Eventos_superavit_hist</li> <li> NOTA_PARA_ABRIR_LOS_EXCEL</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> 2.6_fut</li> <li> 8.5_fut -&gt; ambas carpetas contienen los gráficos de mapas de calor para los dos escenarios de clima futuro SSP 2.6 y 8.5, así como de la serie histórica.</li> <li> Eventos_Sequia_fut2.6</li> <li> Eventos_Sequia_fut8.5 -&gt; archivos en formato .csv que muestra los valores de magnitud y duración de los eventos de sequía para los dos escenarios de clima futuro SSP 2.6 y 8.5.</li> <li> Eventos_Sequia_hist1 -&gt; archivo en formato .csv que muestra los valores de magnitud y duración de la sequía (SPI) histórica.</li> <li> Eventos_superavit_fut2.6</li> <li> Eventos_superavit_fut8.5 -&gt; archivos en formato .csv que muestra los valores de magnitud y duración de los eventos de superávit para los dos escenarios de clima futuro SSP 2.6 y 8.5.</li> <li> Eventos_superavit_hist -&gt; archivo en formato .csv que muestra los valores de magnitud y duración de los eventos de superávit histórico.</li> </ul>



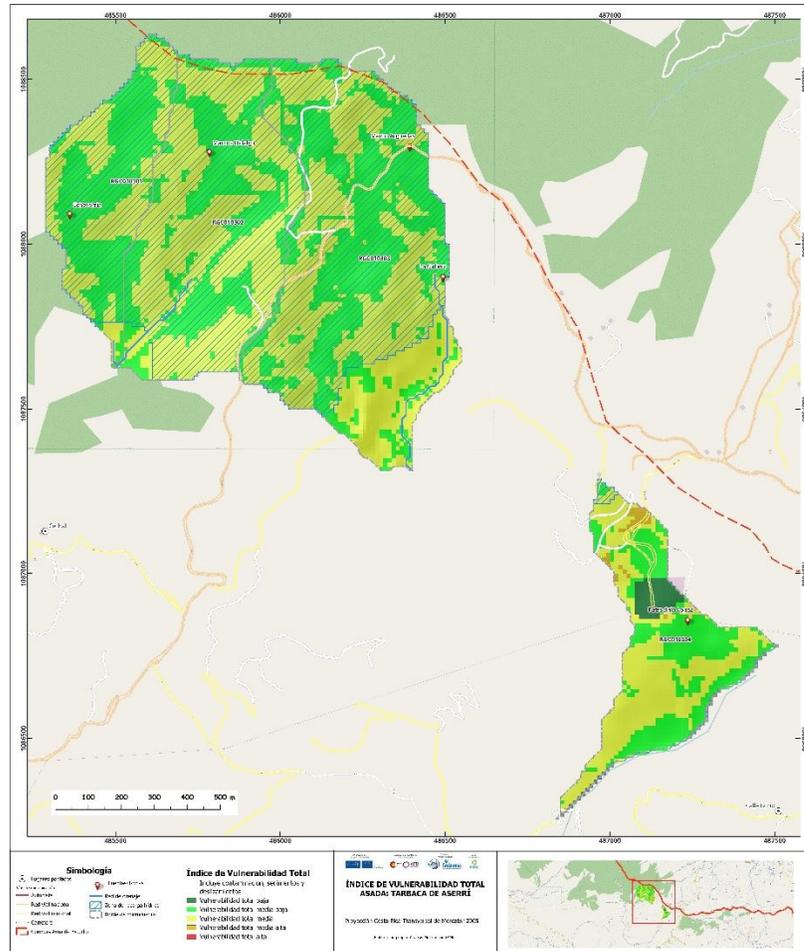
En cuanto a la susceptibilidad a la producción de sedimentos exportados al drenaje superficial de ríos y riachuelos, se observa un potencial de producción de sedimentos que varía de baja a media baja, con muy pequeñas áreas con potencial alta, según las cinco categorías de sedimentación establecidas en esta zonificación.



**Figura 13.** Zonificación del potencial de producción de sedimentos exportado al drenaje superficial de ríos y riachuelos de la ASADA.

En el caso de la vulnerabilidad a deslizamientos, se implementó el método morfométrico desarrollado por Quesada, A. y Feoli, S. en 2018. Este enfoque se fundamenta en el cálculo de cuatro factores clave: densidad de la disección (D), profundidad de la disección (P), energía del relieve (E) y erosión total (ET). Similar a los casos previos, la aplicación de esta metodología generó un mapa que clasifica la susceptibilidad a deslizamientos en cinco categorías. En el contexto de esta ASADA, las categorías de susceptibilidad abarcan desde media baja, media a media alta en su totalidad, evidenciando un riesgo latente de deslizamientos en las áreas circundantes a las fuentes de captación de agua de la ASADA durante episodios con precipitaciones intensas.





**Figura 15.** Zonificación del índice de vulnerabilidad total de la ASADA con sus respectivas áreas potenciales de recarga hídrica.

Su base de datos está contenida en la carpeta **d) Zonificación de amenazas y vulnerabilidad al recurso hídrico** y en ella, encontrará las siguientes carpetas:

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Contaminación difusa</li> <li>■ Deslizamientos</li> <li>■ Recarga hídrica</li> <li>■ Sedimentos</li> <li>■ Zonificación_vulnerabilidad_total -&gt; carpetas que contienen la siguiente información:</li> </ul>	
<p>La carpeta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Contaminación difusa contiene dos carpetas:</li> <li>■ Indice_Contaminacion_Difusa_raster</li> <li>■ Indice_Contaminacion_Difusa_x_ASADA</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Indice_Contaminacion_Difusa_raster -&gt; archivo ráster (.tif) del índice de contaminación difusa de la o las microcuencas de la ASADA debidamente categorizada.</li> <li>■ Indice_Contaminacion_Difusa_x_ASADA -&gt; archivo vectorial (.shp) del índice de contaminación difusa de la o las microcuencas de la ASADA.</li> </ul>

<p>La carpeta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Deslizamientos</li> </ul> <p>contiene dos carpetas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ desliz_shapes</li> <li>■ desliz_x_micro_raster</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>desliz_shapes</b> -&gt; archivo vectorial (.shp) de la vulnerabilidad a deslizamiento de la o las microcuencas de la ASADA.</li> <li>■ <b>desliz_x_micro_raster</b> -&gt; archivos ráster (.tif) de la vulnerabilidad a deslizamiento de la o las microcuencas de la ASADA debidamente categorizada.</li> </ul>
<p>La carpeta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Recarga hidrica</li> </ul>	<p>Descripción del archivo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Recarga hidrica</b> -&gt; archivo vectorial (.shp) de las áreas potenciales de recarga hídrica de la o las microcuencas de la ASADA. Categorizada en recarga (1) y no recarga (0).</li> </ul>
<p>La carpeta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sedimentos</li> </ul> <p>contiene dos carpetas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ datos_entrada</li> <li>■ Sedimentos_InVEST</li> </ul>	<p>Descripción del archivo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Sedimentos</b> -&gt; aloja los datos de entrada y los datos de salida de la aplicación del modelo InVEST de sedimento, en archivos ráster (.tif) y vectoriales (.shp) de la o las microcuencas de la ASADA debidamente categorizada.</li> <li>■ <b>datos_entrada</b></li> <li>■ <b>Sedimentos_InVEST</b> -&gt; en la carpeta <b>datos_entrada</b> están los archivos requeridos para aplicar el modelo InVEST, y en la carpeta <b>Sedimentos_InVEST</b> están los archivos de salida del modelo de sedimentos una vez aplicado en modelo InVEST. En esta carpeta también encontrará el archivo sedimento debidamente categorizado, como: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>reclas_sed_export_Microcuencas</b></li> </ul> </li> </ul>
<p>La carpeta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zonificación_vulnerabilidad_total</li> </ul> <p>contiene tres carpetas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ diseños_impresion</li> <li>■ vulnerabilidad_total_raster</li> <li>■ vulnerabilidad_total_shape</li> </ul>	<p>Descripción de los archivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>diseños_impresion</b> -&gt; archivo .jpeg que corresponde al diseño de impresión del mapa de vulnerabilidad total.</li> <li>■ <b>vulnerabilidad_total_raster</b> -&gt; archivos ráster (.tif) del índice de vulnerabilidad total de la o las microcuencas de la ASADA.</li> <li>■ <b>vulnerabilidad_total_shape</b> -&gt; archivo vectorial (.shp) del índice de vulnerabilidad total de la o las microcuencas de la ASADA.</li> </ul>

## 5.4 RESULTADO: SÍNTESIS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE AMENAZA HIDROMETEOROLÓGICA Y DE VULNERABILIDAD TERRITORIAL Y GEOGRÁFICA

### *Síntesis de medidas de adaptación a partir del análisis de la amenaza hidrometeorológica:*

En el contexto territorial y geográfico, la ASADA se caracteriza por una gradiente climática de un clima tropical estacional (Alajuela, Heredia, San José) hacia un clima tropical húmedo con menor influencia de lluvias estacionales (Cartago) del Caribe. Adicionalmente, las fuentes de captación de agua de la ASADA pueden cubrir rango de elevación de menos de 1000 a más de 2000 msnm que se manifiesta en temperaturas menores en altitud y subsecuentemente en la evapotranspiración (ETP).

Por ello y otros factores ambientales como la geología, suelo, cobertura, algunas fuentes de captación de agua de la ASADA cuentan con mayor o menor disponibilidad física de agua como esta manifestado de manera muy simplificada en el volumen anual de lluvia y con más detalle en el BC mensual. Este último índice muestra la distribución de agua superficial potencialmente disponible en la o las microcuencas de la ASADA después de satisfacer la demanda evaporativa. Un BC negativo significa déficit de agua en mm y un BC positivo superávit de agua disponible para un posible uso.

Históricamente hubo meses con déficit de agua en la ASADA - TARBACA DE ASERRÍ, SAN JOSÉ, aunque el promedio se mantiene en positivo. El déficit del recurso coincide con la estación seca climática de la región cuando hay mayor demanda del recurso. Dicha climatología posiblemente se mantiene a futuro, pero los extremos aumentan con mayor déficit de agua en los meses de la estación seca y meses húmedos con mayor superávit de agua. Menos lluvia se puede traducir en una disminución de la recarga acuífera y a mediano plazo en una disminución de la tabla freática del agua subterráneo si la ASADA se abastece primordialmente de fuentes subterráneas. Si la ASADA captan agua de nacientes más superficiales o directamente de quebradas, el riesgo aumenta de que estas fuentes se sequen con mayor frecuencia en época seca. Contrario, a meses con lluvia extrema significa agua que escurre rápidamente y que no es útil para abastecimiento. Estos eventos húmedos más bien pueden representar un riesgo para la infraestructura como, las captaciones de agua y/o tuberías sobre todo en terrenos susceptibles a deslizarse.

Algunas medidas para considerar:

1. Mejorar las estructuras de captación y almacenamiento de agua utilizando materiales y diseños resistentes a los efectos del cambio climático como, por ejemplo; los sistemas de drenaje alrededor de las estructuras de captación para manejar el exceso de agua durante fuertes lluvias y reducir la erosión del suelo, protegiendo así la calidad del agua. También establecer muros de contención en áreas propensas a deslizamientos de tierra para proteger las infraestructuras críticas de la ASADA y evitar daños durante eventos climáticos extremos, así como utilizar tecnologías anti-erosión, como revestimientos protectores o técnicas de infraestructura verde, para salvaguardar las estructuras de captación y almacenamiento de agua a los efectos de la erosión laminar causada por eventos climáticos extremos.
2. Mejorar y diversificar los sistemas de captación de agua de lluvia, utilizando tecnologías como cosecha de agua de lluvia.

3. Establecer sistemas de monitoreo continuo para evaluar los niveles de agua en tiempo real y anticipar cambios significativos. Esto permitirá ajustar la gestión del agua según las variaciones climáticas observadas.
4. Educar a las comunidades sobre la importancia de la conservación del agua y la preparación para eventos climáticos extremos. Incluye fomentar prácticas sostenibles de uso del agua y la participación de la comunidad en la gestión de los recursos hídricos.
5. Diversificar las fuentes de captación de agua para reducir la dependencia de una única fuente, lo que aumenta la resiliencia ante las variaciones climáticas locales.

***Recomendaciones generales de medidas de adaptación a partir del análisis de la zonificación de la vulnerabilidad territorial y geográfico:***

A partir de este análisis se recomienda las siguientes medidas de prevención/adaptación:

**Contaminación No Puntual o Difusa:**

El principal objetivo de estas medidas es evitar que los contaminantes lleguen a las fuentes de captación de agua potable de la ASADA. La prevención y adaptación ante contaminación difusa de fuentes de agua potable es crucial para garantizar la salud de la población. Algunas medidas efectivas incluyen:

1. En las áreas críticas, establecer zonas de protección alrededor de las fuentes de captación de agua para prevenir la contaminación de actividades cercanas.
2. Promover el uso responsable de fertilizantes y pesticidas, así como la implementación de prácticas agrícolas que minimicen la escorrentía de contaminantes hacia las fuentes de agua.
3. Implementar técnicas para reducir la erosión del suelo, como la siembra de cobertura, terrazas y prácticas de labranza conservacionista.
4. Establecer programas de monitoreo continuo de la calidad del agua para detectar tempranamente cualquier contaminación y poder tomar medidas correctivas de inmediato.
5. Involucrar a la comunidad en la protección de las fuentes de captación de agua, educándolas sobre prácticas seguras y fomentando la denuncia de posibles contaminaciones.
6. Fortalecer y hacer cumplir las leyes y regulaciones ambientales relacionadas con la protección del agua potable, imponiendo sanciones a quienes incumplen estas normativas.
7. Considerar tecnologías mejoradas de tratamiento de agua para eliminar contaminantes difusos antes de que lleguen a la red de suministro.

**Producción de Sedimentos:**

El objetivo es minimizar la carga de sedimentos que llegan a las fuentes de captación de agua de la ASADA y de sus ríos, riachuelos o quebradas. Las medidas de prevención y adaptación climática ante la entrada o exceso de sedimentos en las fuentes de agua son fundamentales para garantizar la seguridad del suministro a la población. Algunas estrategias que podrían considerarse:

1. Implementar prácticas de conservación de suelos y agua para controlar la erosión laminar en las áreas circundantes a las fuentes de agua, como la revegetación de laderas, la construcción de terrazas, y la aplicación de barreras físicas.

2. Establecer sistemas de monitoreo continuo para evaluar sedimentos en la calidad del agua. Esto puede incluir tecnologías de sensores y estaciones de monitoreo distribuidas estratégicamente.
3. Considerar la instalación de infraestructuras específicas, como barreras de sedimentación y trampas de sedimentos para capturar y retener los sedimentos antes de que ingresen a las fuentes de captación de agua.
4. Promover prácticas agrícolas y de uso del suelo que minimicen la erosión, como cultivos de cobertura, rotación de cultivos y técnicas de labranza conservacionista. Así mismo, promover en el área de la o las microcuencas sistemas agroforestales y silvopastoriles y programas de reforestación en aquellas áreas que así lo ameriten.
5. Desarrollar programas de educación para la comunidad sobre la importancia de conservar las fuentes de agua, así como la adopción de prácticas sostenibles en la gestión del suelo y agua.
6. Implementar proyectos de restauración de microcuencas hidrográficas para proteger y mejorar la salud general del ecosistema.
7. Integrar consideraciones de manejo de sedimentos en la planificación urbana, asegurando que las nuevas construcciones y desarrollos urbanos minimicen la escorrentía superficial y la erosión de los suelos.

### Deslizamientos

Las medidas de prevención y adaptación ante deslizamientos en las microcuencas o áreas cercanas a fuentes de captación de agua son fundamentales para garantizar la seguridad hídrica de la población. Aquí hay algunas estrategias generales:

1. Desarrollar políticas de ordenación en la o las microcuencas de la ASADA que limiten la construcción en áreas de alto riesgo de deslizamientos.
2. Fomentar programas de reforestación en áreas críticas para fortalecer la estabilidad del suelo.
3. Construir estructuras de contención, como muros y terrazas, en áreas identificadas como propensas a deslizamientos. Estas medidas ayudan a estabilizar el terreno.
4. Establecer sistemas de alerta temprana que utilicen datos geoespaciales y meteorológicos para prever que eventos de lluvias intensas puedan desencadenar deslizamientos. La población debe recibir información oportuna.
5. Realizar programas educativos para informar a la población sobre los riesgos asociados con los deslizamientos y promover prácticas seguras en el uso del suelo.
6. Fomentar la colaboración entre entidades gubernamentales, ONG, y la comunidad local para implementar estrategias integrales de prevención y adaptación a los deslizamientos.

Todas estas estrategias, cuando se aplican de manera integral y a escala de la o las microcuencas, pueden contribuir significativamente a la prevención y adaptación de las amenazas a la calidad del agua de las fuentes de captación de agua de la ASADA y, sobre todo hacerlas resilientes a los efectos del cambio climático a futuro. Entonces será crucial involucrar a todas partes, incluyen las comunidades, los agricultores, ganaderos, las universidades y las entidades gubernamentales, para entre todos lograr una sostenibilidad del funcionamiento de la ASADA a largo plazo.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Budyko, M.I. (1972). The future of climate. *Eos. American Geophysical Union*. 53 (10): 868–874.
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P.D., Lister, D.H. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 7: 109.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.
- McKee, T.B., N. J. Doesken, and J. Kliest (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA. 179-18.
- OpenTopography - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. (s/f). Recuperado el 29 de agosto de 2023, <https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.042013.4326.1>
- Pimenova, O., Roberts, C., & Rizos, C. (2022). Regional “Bare-Earth” Digital Terrain Model for Costa Rica Based on NASADEM Corrected for Vegetation Bias. *Remote Sensing*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/RS14102421>
- Pierce D, Cayan D, Maurer E, et al. (2015) Improved bias correction techniques for hydrological simulations of climate change. *Journal of Hydrometeorology* 16: 2421–2442. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0236.1
- R package „SPEI“: Beguera S, Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34(10): 3001-3023.
- TRAGSA; TRAGSATEC; Ministerio del Medio Ambiente. 1998. Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, Mundi prensa, ES. 945 p.
- SNIT. (s/f). Recuperado el 29 de agosto de 2023, de <https://www.snitcr.go.cr/>
- Villón, M. 2004. Hidrología. Cartago, CR. ITCR. 475 p.