

Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial Ambiental (PIOTA) para la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, Autoridad del Canal de Panamá

Producto 2: Tendencias y Escenarios

21 de Abril de 2021

Ciudad de Panamá

IDOM
FutureWater

 **BID**
Banco Interamericano
de Desarrollo


CANAL DE PANAMÁ

Contenido

- 2 PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIOS..... 6
 - 2.1 Construcción del Modelo de Oferta/Demanda para la capacidad hídrica (WEAP)..... 6
 - 2.1.1 Integración del diagnóstico territorial..... 6
 - 2.1.2 Aproximación metodológica para el cálculo de la robustez climática 6
 - 2.1.3 Desarrollo de la herramienta..... 7
 - 2.1.4 Proceso participativo.....27
 - 2.1.5 Identificación e inclusión de indicadores de desempeño y umbrales28
 - 2.2 Clima histórico y proyecciones.....29
 - 2.2.1 Tendencias en el periodo histórico.....29
 - 2.2.2 Regionalización de proyecciones.....31
 - 2.2.3 Identificación y caracterización del clima futuro34
 - 2.3 Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático.....36
 - 2.3.1 Metodología.....36
 - 2.3.2 Caracterización de la amenaza climática.....39
 - 2.3.3 Categorización y clasificación espacial del riesgo climático por subcuencas y corregimientos39
 - 2.3.4 Lineamientos para la adaptación39
 - 2.4 Escenarios de desarrollo territorial.....40
 - 2.4.1 Prospectiva: Identificación, análisis y prospectiva de variables básicas.....40
 - 2.4.2 Consideración de escenarios en términos de demanda48
 - 2.4.3 Validación de los escenarios a modelar.....50
 - 2.4.4 Modelo territorial futuro51
 - 2.5 Análisis de balance hídrico y robustez climática.....52
 - 2.5.1 Descripción escenarios a simular52
 - 2.5.2 Resultados para condiciones de línea base.....53
 - 2.5.3 Resultados del escenario tendencial.....54
 - 2.5.4 Resultado de los escenarios de posible intervención territorial.....54
 - 2.5.5 Análisis de sensibilidad55
 - 2.6 Rutas de adaptación.....56
 - 2.6.1 Diseño y formulación.....56
 - 2.6.2 Identificación de acciones de no arrepentimiento56
 - 2.6.3 Co-beneficios y sinergias.....56
 - 2.6.4 Vulnerabilidades residuales.....56

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología RDM aplicada a la Fase de Prospectiva del proyecto PIOTA.....	7
Figura 2. Evolución del número de documentos científico-técnicos que han referenciado o usado WEAP u otros modelos de simulación para la planificación hidrológica en el periodo 1990-2017.....	7
Figura 3. Fases en la construcción de un modelo en WEAP.....	8
Figura 4. Esquema de simulación empleado para la fase de prospectiva del PIOTA.....	9
Figura 5. Esquema topológico del sistema de recursos hídricos de la CHCP.....	9
Figura 6. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional urbana-industrial para los subsistemas Gatún (PUI.GAT, izqda.) y Alhajuela (PUI.MAD, dcha.).....	11
Figura 7. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda urbana en el subsistema Alhajuela (PUI.MAD) en el modelo WEAP-CHCP.....	11
Figura 8. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional rural para los subsistemas Gatún (PR.GAT) y Alhajuela (PR.MAD).....	12
Figura 9. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda rural del subsistema Gatún en el modelo WEAP-CHCP.....	12
Figura 10. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda agropecuaria (A.GAT y A.MAD).....	12
Figura 11. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda de esclusaje en el subsistema Gatún (T.GAT) en el modelo WEAP-CHCP.....	13
Figura 12. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda de esclusaje (T.GAT).....	13
Figura 13. Ubicación de los embalses Gatún y Alhajuela en el esquema topológico del modelo WEAP-CHCP.....	13
Figura 14 Método hidrológico de WEAP.....	15
Figura 15 Esquema topológico del módulo hidrológico en WEAP.....	15
Figura 16 Delimitación de subcuencas.....	16
Figura 17 Agrupación estaciones homogéneas.....	17
Figura 18 Datos de precipitación en la estación Arca Sonia de ETESA.....	18
Figura 19 Ejemplo gráficos dobles masas.....	18
Figura 20 Polígonos de Thiessen.....	19
Figura 21 Serie de precipitación areal 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP.....	20
Figura 22 Estaciones termométricas.....	20
Figura 23 Serie de temperatura 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP.....	22
Figura 24 Datos de humedad relativa.....	23
Figura 25 Datos de velocidad del viento a 2 metros.....	23
Figura 26 Estaciones hidrométricas.....	24
Figura 27 Caudales observados y simulados en el río Pequení para el periodo de calibración (2009-2018).....	26
Figura 28 Caudales observados y simulados en el río Pequení para el periodo de validación (1999-2008).....	27
Figura 29 Caudales observados y simulados en el río Gatún con la estimación inicial (1989-2018).....	27
Figura 30 Caudales observados y simulados en el río Gatún después de la calibración (1989-2018).....	27
Figura 31. Etapas del proceso RDM y talleres de participación y capacitación realizados durante la Fase de Prospectiva.....	28
Figura 32. Distribución de estaciones pluviométricas usadas para la caracterización histórica del clima.....	29
Figura 33. Rangos de dispersión de la precipitación anual en las estaciones de la cuenca (periodo 1979-2005).....	30
Figura 34. Evolución histórica de la precipitación anual en la cuenca (periodo 1979-2005).....	30
Figura 35. Precipitación mensual promedio en la cuenca (periodo 1979-2005).....	30
Figura 36. Evolución histórica de la temperatura media anual y tendencia interanual en la estación GAM.....	30
Figura 37. Rangos de variación de precipitación y temperatura anual promedio predichos por los modelos de los ensambles CORDEX (regionalización dinámica) y NASA-NEX (regionalización estadística) para los horizontes climáticos 2015-2045 (centrado en 2030) y 2045-2075 (centrado en 2060).....	32
Figura 38. Dispersión en la estacionalidad entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos locales.....	33

Figura 39. Dispersión en la tendencia normalizada entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos locales.....	33
Figura 40. Obtención de puntuación global y ordenación (e.j. para variable prec.).....	33
Figura 41. Proyecciones climáticas de la temperatura hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5. El histórico.....	34
Figura 42. Proyecciones climáticas de la precipitación hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5. El histórico.....	34
Figura 43. Cambios medios proyectadas en temperatura y precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.....	34
Figura 44. Cambios proyectados en la estacionalidad de la precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.....	35
Figura 45. Cambios proyectados en la estacionalidad de la temperatura para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.....	35
Figura 46. Conceptualización del riesgo climático.....	36
Figura 47. Variables utilizadas para la determinación del Riesgo Climático.....	39
Figura 48. Zonas poblacionales estudio Stantec.....	40
Figura 49. Esquema de metodología utilizada para la proyección de población de la CHCP.....	43
Figura 50. Esquema de metodología utilizada para la proyección de las 8 zonas poblacionales.....	45
Figura 51. Variables territoriales.....	47
Figura 52. Rango de variación de cambios multiplicativos de precipitación y aditivos de temperatura simulados en el modelo WEAP-CHCP.....	52
Figura 53. Curvas elevación-volumen (izqda.) y guía (dcha.) para los embalses de Alhajuela (panel superior) y Gatún (panel inferior).....	53
Figura 54. SRC para la condición de línea de base calculada para la cobertura anual promedio de la Cuenca (panel izqdo.), y la cobertura para la demanda de esclusaje (panel dcho.).....	54
Figura 55. Superficie de Respuesta Climática del escenario tendencial sobre los cuatro horizontes analizados (2025, 2030, 2040 y 2070).....	54
Figura 56. Valores de robustez climática para diferentes umbrales de garantía fijados para la cobertura promedio anual.....	55
Figura 57. Curva de robustez climática según nivel de garantía en la satisfacción de la demanda para la demanda urbana y de esclusaje.....	55

Índice de tablas

Tabla 1. Principales características de la herramienta WEAP.....	7
Tabla 2. Dominio y parámetros generales de simulación para el modelo WEAP-CHCP.....	8
Tabla 3. Listado de subcuencas representadas y simuladas en el modelo WEAP-CHCP.....	10
Tabla 4. Caracterización de nodo de demanda poblacional urbano-industrial (PUI) en WEAP-CHCP.....	11
Tabla 5. Caracterización de nodo de demanda poblacional rural (PR) en WEAP-CHCP.....	12
Tabla 6. Caracterización de los nodos de demanda agropecuaria (A) en WEAP-CHCP.....	12
Tabla 7. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.....	14
Tabla 8. Área y latitud de cada subcuenca.....	16
Tabla 9. Grupos homogéneos y estación de referencia.....	17
Tabla 10. Coeficiente de Thiessen por subcuenca.....	19
Tabla 11. Número de meses con dato de temperatura.....	21
Tabla 12. Estaciones termométricas.....	21
Tabla 13. Gradiente térmico por subcuenca.....	22
Tabla 14. Humedad relativa.....	23
Tabla 15. Velocidad del viento.....	23
Tabla 16. Estaciones hidrométricas.....	24
Tabla 17. Parámetros del suelo en el modelo WEAP.....	24
Tabla 18. Criterios de valoración de los índices NSE y PBIAS para la calibración.....	26
Tabla 19. Rango de parámetros del modelo WEAP después de la calibración.....	26
Tabla 20. Resumen de los indicadores después del proceso de calibración y validación del modelo.....	26
Tabla 21. Modelos climáticos incluido en el ensamble NASA-NEX y sus características.....	31
Tabla 22. Modelos climáticos incluido en el ensamble NASA-NEX y sus características.....	31
Tabla 23. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas.....	37
Tabla 24. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a periodos de altas temperaturas.....	37
Tabla 25. Nivel de amenaza climática asociada a inundaciones y deslizamientos.....	37
Tabla 26. Categorización del nivel de amenaza climática asociada a periodos de altas temperaturas.....	38
Tabla 27. Variables vinculadas a la valoración de la vulnerabilidad.....	38
Tabla 28. Rango de clasificación de la vulnerabilidad.....	39
Tabla 29. Matriz de amenaza y vulnerabilidad.....	39
Tabla 30. Consumo per cápita de agua potable (en gal./hab./día) por tipo de conexión y categoría poblacional.....	40
Tabla 31. Porcentajes del agua contabilizada y no contabilizada por categoría poblacional.....	41
Tabla 32. Demanda per cápita de agua potable para el escenario tendencial.....	41
Tabla 33. Dotación per cápita por zona poblacional.....	41
Tabla 34. Demandas de agua para la navegación por tipo de esclusaje y escenario.....	41
Tabla 35. Demanda agrícola de agua de cultivos de piña y café.....	42
Tabla 36. Consumo de agua por cabeza de ganado vacuno al año (según tipo de animal).....	42
Tabla 37. Consumo de agua de ganado vacuno (m3) en la CHCP (año 2011).....	42
Tabla 38. Tasa de Crecimiento Media Anual por corregimiento de la CHCP.....	43
Tabla 39. Proyección de población de la CHCP por región (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070).....	44
Tabla 40. Tasa de Crecimiento Media Anual por zona de la CHCP.....	45
Tabla 41. Proyección de población de las 8 zonas poblacionales (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070).....	45
Tabla 42. Plantas potabilizadoras.....	46
Tabla 43. Demandas insatisfechas del escenario tendencial.....	46
Tabla 44. Variables territoriales del escenario tendencial.....	48
Tabla 45. Demandas de agua del escenario tendencial.....	49
Tabla 46. Variables territoriales del escenario optimista.....	49
Tabla 47. Demandas de agua del escenario optimista.....	50

Tabla 48. Parametrización de la demanda urbana para la condición de línea de base.....	52
Tabla 49. Parametrización de la demanda rural para la condición de línea de base.....	52
Tabla 50. Parametrización de la demanda agropecuaria para la condición de línea de base.....	53
Tabla 51. Parametrización de la demanda agropecuaria para la condición de línea de base.....	53
Tabla 52. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.....	53
Tabla 53. Robustez climática calculada en función de las superficies de la respuesta para cada horizonte.....	54

Abreviaturas

ACP: Autoridad del Canal de Panamá

ANAM: Autoridad Nacional del Ambiente

AVRC: Análisis de la vulnerabilidad y riesgo frente a amenazas climáticas

BCSD: Método de corrección del sesgo por desagregación espacial

C°: Grados centígrados

CDN-1: Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Panamá

CHCP: Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá

CICH: Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá

CMNUCC: Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CONAGUA: Consejo Nacional del Agua

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

DAFO: Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades

ERM: Environmental Resources Management

ETCCDI: Panel de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático

ETESA: Empresa de Transmisión Eléctrica

EUROCLIMA+: Programa de la Unión Europea sobre sostenibilidad ambiental y cambio climático en América Latina.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GIS: Geographical Information Systems

HA: Hectáreas (ha)

HIAM: Sección de Meteorología e Hidrología

IDAAN: Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censo

M: metros (m)

MiAmbiente: Ministerio de Ambiente

Mm: milímetros (mm)

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NASA-NEX: NASA Earth Exchange

NEX-GDDP: NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections

NSE: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

PBIAS: Desviación relativa de caudales

PIEA: Programa de Incentivos Económicos Ambientales

PIOTA: Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial Ambiental

POT: Plan de Ordenamiento Territorial

RCPs: Trayectorias de Concentración Representativas

RDM: Toma de Decisiones Robusta

SAGARPA: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

SRC: Superficie de Respuesta Climática

Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA)

T°: Temperatura

USAID: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional

WEAP: Water Evaluation and Planning System

WMO: Organización Meteorológica Mundial

WSDI: Índice de días cálidos - Warm Spell Duration Index

Introducción

El presente documento consolida la segunda etapa para la construcción del Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial y Ambiental (PIOTA) para la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP). Este proceso, liderado por parte de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), tiene por objetivo principal ofrecer los lineamientos estratégicos necesarios para consolidar una propuesta de desarrollo sostenible para la CHCP. El PIOTA procura, por tanto, favorecer la realización de usos y actividades humanas contribuyendo a la cohesión social con un modelo de gestión territorial que garantiza el correcto mantenimiento de los recursos naturales, considerando, de modo especial, las incertidumbres asociadas a una variabilidad climática que ya es sensible y que pone de manifiesto una serie de amenazas que deben, irremediablemente, ser adecuadamente considerada en la toma de decisiones.

Precisamente este capítulo, bajo el título de “Prospectiva: tendencias y escenarios”, ofrece el resultado de un conjunto de análisis técnicos realizados con el propósito de evaluar cómo la evolución del clima futuro puede transformar la realidad diagnosticada y qué medidas de adaptación será conveniente desarrollar para minimizar eventuales impactos sobre las poblaciones, ecosistemas, infraestructuras y actividades en la CHCP. La gestión de los recursos hídricos, como elemento estructurante de las dinámicas naturales y socioeconómicas en este territorio, ha concentrado el mayor esfuerzo de análisis. Concretamente, se ha estructurado un sistema completo de simulación numérica avanzado (modelo de oferta/demanda) para evaluar el comportamiento del balance hídrico de la Cuenca bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial, horizontes temporales e hipótesis acerca de la evolución del clima futuro.

Este trabajo se ha desarrollado bajo la metodología de “toma de decisiones robusta” (*Robust Decision Making-RDM*, por sus siglas en inglés), de modo que, desplegando un proceso técnico-participativo con la ACP y actores socioeconómicos clave, ha sido posible determinar por un lado las condiciones bajo las cuales el sistema hidrológico puede seguir proveyendo bienes y servicios y, por otro, diseñar las diferentes opciones de adaptación que pueden ser implementadas – por medio de rutas estratégicas de adaptación – para garantizar las condiciones de resiliencia necesarias.

BORRADOR

2 PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIOS

2.1 Construcción del Modelo de Oferta/Demanda para la capacidad hídrica (WEAP)

2.1.1 Integración del diagnóstico territorial

Esta segunda fase del PIOTA parte de los análisis realizados en la fase anterior de diagnóstico integral. Así, las tendencias y evolución previsible tienen su origen en los datos que, de modo sectorial, fueron estudiados anteriormente. Como conclusión de la fase de diagnóstico integral del PIOTA se realizó un análisis de problemas y oportunidades que, a su vez, se sintetizó en un DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades). Esta síntesis DAFO sirvió para establecer una serie de indicadores, los cuales tenían por objetivo determinar el estado del territorio de la Cuenca con relación a los diferentes aspectos analizados.

Estos indicadores, que sintetizan la línea de base de la CHCP, han sido el fundamento para construir los escenarios territoriales, es decir, variables que permiten general un modelo de desarrollo territorial a futuro. A modo de ejemplo, el más evidente es el crecimiento poblacional: un incremento de la población significa la necesidad de aumentar el suelo destinado a usos residenciales (para acoger a los nuevos habitantes), mayores recursos de agua para abastecimiento, etc. Pero, a estas consecuencias de tipo inmediato, es necesario añadir la incertidumbre climática que influye en la disponibilidad de recursos y, de igual modo, las acciones sobre el territorio pueden incidir en la mayor o menor resiliencia del territorio frente al cambio climático. Así, y como se describe en posteriores apartados, se ha construido un modelo que integra las principales variables territoriales identificadas en la fase de diagnóstico con las proyecciones de cambio climático con el objetivo de identificar el impacto del cambio climático en la CHCP.

2.1.2 Aproximación metodológica para el cálculo de la robustez climática

El objetivo principal de la Fase de Prospectiva del proyecto PIOTA es evaluar la robustez climática del sistema de recursos hídricos de la Cuenca Hidrológica del Canal de Panamá, esto es, la capacidad del sistema para cubrir las demandas de agua actuales y futuras bajo el rango probable de incertidumbre climática esperado por efecto del cambio climático. Las demandas de agua futuras se analizarán bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial los cuales se proyectarán a diferentes horizontes temporales en un intento de incorporar las tendencias de cambio esperadas y deseadas en la cuenca, así como la adopción de actuaciones y portafolios de medidas de adaptación que den soporte al Plan de Ordenamiento Territorial Ambiental de la Cuenca Hidrológica del Canal de Panamá (CHCP).

Para el análisis de robustez climática se ha empleado una Toma de Decisiones Robusta (RDM¹) en la que se adopta una aproximación ascendente o abajo-arriba (*bottom-up*). Esta metodología comienza con el análisis del comportamiento de un sistema el cual se modeliza para conocer su respuesta (ej. capacidad para hacer satisfacer las demandas de agua) frente a un rango plausible de condicionantes climáticos, ambientales y de gestión. En un paso posterior, la respuesta del sistema es evaluada en combinación con los patrones de cambio climático proyectados por un conjunto o ensamble de modelos, en un intento de calcular la probabilidad de cumplir con unos criterios de garantía, previamente concertados con los agentes locales a través de mecanismos de participación. La metodología RDM contrasta con las aproximaciones clásicas de arriba-abajo (*top-down*), donde las proyecciones de cambio climático son utilizadas para forzar las herramientas de modelización en un intento de predecir el comportamiento del sistema. En general, los resultados derivados de los métodos arriba-abajo o de análisis de escenarios están sujetos a mayores incertidumbres que los métodos abajo-arriba o de análisis de sistemas. Igualmente,

los RDM se han demostrado muy apropiados para dar soporte a análisis de coste-efectividad y coste-beneficio asociados a la elaboración de programas de medidas para adaptación al cambio climático.

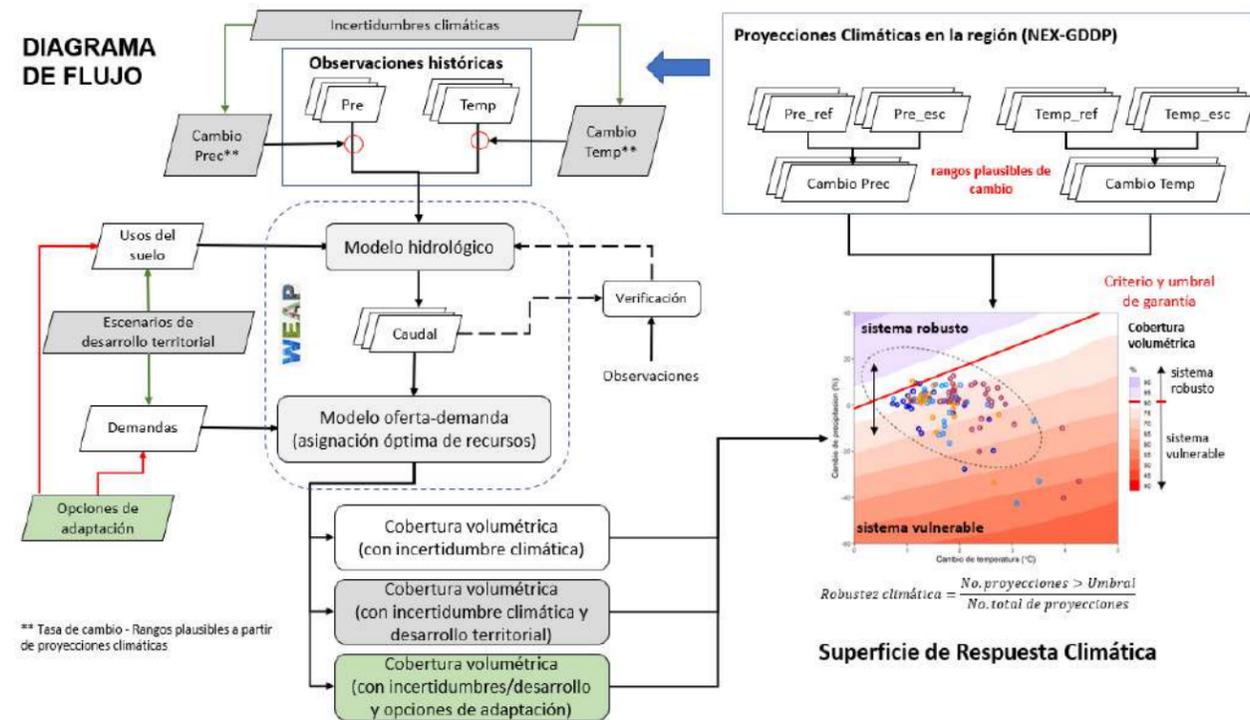
La aplicación de la metodología RDM, como apoyo a la planificación territorial, es una novedad y presenta desafíos en cuanto al diseño de las herramientas de modelización y la obtención de una propuesta concreta de imagen objetivo y su consecución con el diseño de rutas de adaptación robustas. En esencia, la aplicación de una metodología RDM consta de tres fases:

- Fase de exploración, construcción y concertación
- Fase de evaluación de impactos o vulnerabilidad
- Fase de definición y selección de opciones para la gestión del riesgo o la adaptación

En la Figura 1 se resume de manera esquemática el diagrama de flujo empleado para la aplicación del método RDM en el sistema de recursos hídricos de la Cuenca Hidrológica del Canal de Panamá. En una primera fase, se procede a la construcción, parametrización y verificación de la bondad del modelo hidrológico y de oferta-demanda de la cuenca para reproducir los patrones de generación y asignación de recursos hídricos observados en la cuenca (sección 2.1.3 *Desarrollo de la herramienta*). En paralelo, se procede a la caracterización del clima histórico a partir de observaciones y a la regionalización del clima futuro a partir de los modelos y escenarios de cambio climático seleccionados para la región de estudio (sección 2.2 *Clima histórico y proyecciones*). La aplicación de los modelos, los cuales fueron implementados con la herramienta WEAP, permite el cálculo de uno o varios indicadores de desempeño que informan sobre la capacidad del sistema para satisfacer un criterio. En el caso concreto del PIOTA, el indicador de desempeño seleccionado es la cobertura volumétrica de agua definida como el % de la demanda de agua (incluida las pérdidas de agua del sistema) que se satisface (sección 2.1.5 *Identificación e inclusión de indicadores de desempeño y umbrales*). En un primero ejercicio de simulación se caracteriza la condición de línea de base, donde el modelo entonces es forzado con el patrón de demandas actuales y con un continuo plausible de variación climática que incluye el clima histórico y un clima histórico-perturbado de acuerdo con el rango plausible de cambios de precipitación y temperatura predichos en la región por los modelos regionales de clima. Se obtiene así la Superficie de Respuesta Climática (SRC) que es la representación gráfica de cómo se comporta la cuenca en términos de cobertura para el continuo de clima simulado. La proyección sobre la SRC de las predicciones proyectadas por los modelos climáticos permite obtener la robustez climática como porcentaje de modelos que están por encima de un umbral de cobertura el cual se establece como nivel de garantía en concertación con los expertos y agentes involucrados en la planificación (sección 2.1.4 *Proceso participativo*). El ejercicio de simulación se repite en fases posteriores considerando diferentes escenarios de desarrollo territorial y de adaptación que pueden incluir cambios en los patrones de uso del suelo, de demanda de agua, cambios en las reglas de operación de las infraestructuras existentes o de prioridad de asignación entre usos, etc.

¹ Robust Decision Making-RDM, por sus siglas en inglés

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología RDM aplicada a la Fase de Prospectiva del proyecto PIOTA.



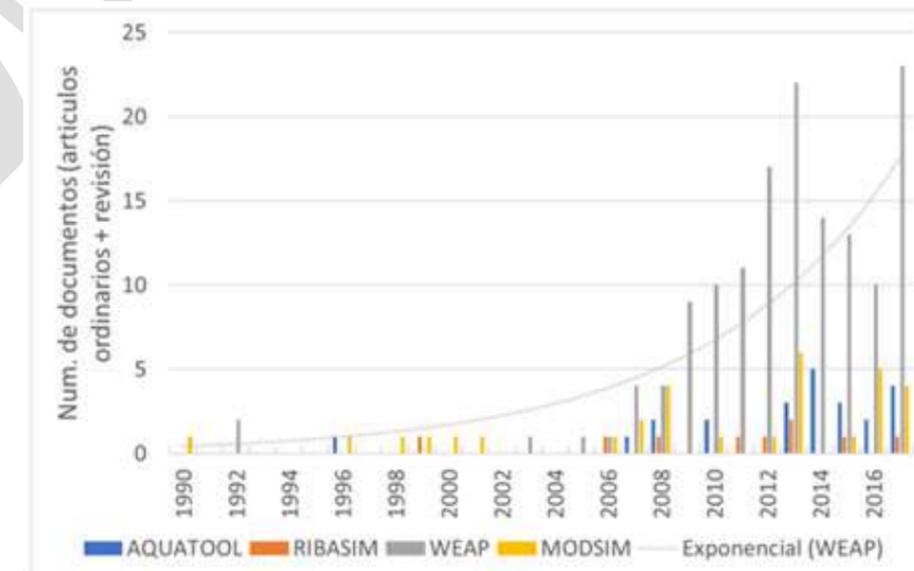
Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Tabla 1. Principales características de la herramienta WEAP

Enfoque integrado	Enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.
Proceso de participación	Una estructura transparente que facilita la participación de los actores involucrados en un proceso abierto.
Balance de Agua	Una base de datos mantiene la información de demanda y suministro para manejar el modelo de balance de masa en una arquitectura de nodo-enlace.
Basado en Simulación	Calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento, descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas.
Escenarios de políticas de uso de agua	Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.
Interfaz amigable	Interfaz gráfica basada en mapas SIG con conceptos de "arrastrar y soltar" ("drag-and-drop") con resultados flexibles como mapas, gráficos y tablas.
Integración de Modelos	Enlaces dinámicos a otros modelos y programas como QUAL2K, MODFLOW, MODPATH, PEST, Excel y GAMS.

Fuente: www.weap21.org

Figura 2. Evolución del número de documentos científico-técnicos que han referenciado o usado WEAP u otros modelos de simulación para la planificación hidrológica en el periodo 1990-2017



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.1.3 Desarrollo de la herramienta

2.1.3.1 Aspectos generales del modelo WEAP-CHCP

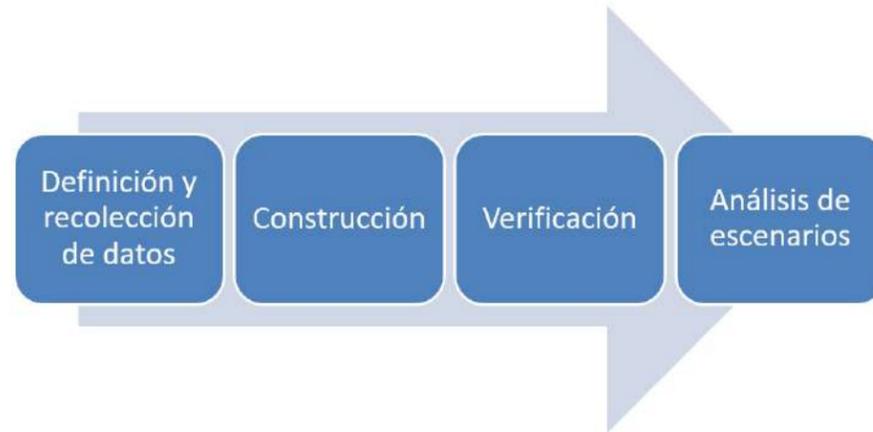
Para evaluar el comportamiento de la cuenca bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial (incertidumbre no climática) y de cambio climático (incertidumbre climática) se ha construido un modelo integrado de simulación hidrológica y asignación de recursos utilizando la herramienta WEAP (Water Evaluation And Planning, www.weap21.org). WEAP es una plataforma de modelización dinámica que integra herramientas de evaluación del balance de agua (modelización hidrológica) y una rutina de optimización para la asignación del recurso disponible entre diferentes nodos de demanda. Las principales características de la herramienta WEAP se recogen en la tabla siguiente. La comunidad de usuarios de WEAP ha crecido considerablemente en los últimos años y es netamente superior a otras herramientas de simulación dinámica para la planificación de recursos hídricos (Figura 2). Este aumento puede ilustrarse a través de la evolución del número de documentos científicos y técnicos que han referenciado a estas herramientas en el periodo 1990-2017.

Las posibilidades ofrecidas por WEAP son amplias. Las principales utilidades se circunscriben a la:

- Evaluación de escenarios climáticos
- Análisis de cambios en condiciones de la cuenca
- Generación de proyecciones de cambio de demanda
- Evaluación de cambios en las condiciones regulatorias y reglas de operación
- Evaluación de impactos por infraestructuras y análisis coste-efectividad/beneficio

Típicamente, el proceso de construcción de un modelo de evaluación-asignación de recursos en WEAP se divide en 4 fases (Figura 3): a) definición de modelo conceptual y recolección de datos; b) construcción y parametrización; c) verificación de resultados, y d) análisis de escenarios de cambio

Figura 3. Fases en la construcción de un modelo en WEAP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

La simulación hidrológica y asignación de recursos en WEAP pivota sobre la construcción de un modelo topológico orientado a objetos (nodos y conexiones). A continuación, se describen los aspectos generales considerados, dejándose para las siguientes secciones una descripción más detallada de la modelización hidrológica, y la parametrización del modelo para las condiciones de línea de base.

2.1.3.1.1 Dominio y parámetros generales de simulación

El ámbito de simulación se circunscribe a los dominios del Sistemas de Recursos Hídricos de la CHCP, que está integrado por la cuenca vertiente al embalse Gatún y las regiones aledañas, cuyas demandas hídricas son total o parcialmente cubiertas con recursos propios generados dentro de los límites físicos de la cuenca. El sistema de recursos hídricos de la CHCP se ha subdividido en dos subsistemas, el subsistema Alhajuela (o Madden), delimitado espacialmente por la cuenca vertiente al embalse Alhajuela, y el subsistema Gatún, que incluye el resto de la CHCP.

La simulación del modelo oferta-demanda se extiende durante un periodo de 31 años (1988-2018) y un paso de tiempo mensual (Tabla 2). Esta resolución temporal de un mes se ha considerado apropiada para el análisis de la robustez climática del sistema y para dar soporte al objetivo de planificación del PIOTA. Es importante advertir que el modelo WEAP-CHCP no se ha pensado como herramienta de gestión operacional del sistema ni tampoco para evaluar el riesgo de inundaciones a eventos extremos de precipitación.

El año 1 del periodo de simulación (1988) se emplea en WEAP como año de base común para todos los periodos y escenarios de simulación planteados. La primera simulación que se extiende entre 1989-2018 refiere a la condición de línea de base o de referencia según terminología de WEAP. Aquí, el modelo se fuerza con el clima histórico observado en dicho periodo y unas demandas de agua que se han proyectadas al horizonte 2020 según los datos más actualizados disponibles; y que fueron recolectados y procesados durante la fase de diagnóstico del PIOTA. Para evaluar la robustez climática de la Cuenca, para diferentes trayectorias de desarrollo territorial y de cambios en las demandas y necesidades hídricas, se han generado tres escenarios de desarrollo adicionales (tendencial, ambicioso, y consensuado) que se proyectan a cuatro horizontes temporales (horizonte 2025, 2030, 2040 y 2070). Para cada combinación escenario-horizonte se fuerza el modelo con la serie histórica de clima para el periodo de referencia (1989-2018), la cuál es previamente perturbada por la incertidumbre climática (cambios plausibles de

precipitación y temperatura) predicha por los modelos regionalizados de cambio climático. En la sección 2.2 Clima histórico y proyecciones se da una explicación detallada del clima histórico y las proyecciones de cambio climático esperados en la Cuenca; mientras que, en la sección 2.4 Escenarios de desarrollo territorial

se describe en profundidad la parametrización de los escenarios territoriales planteados.

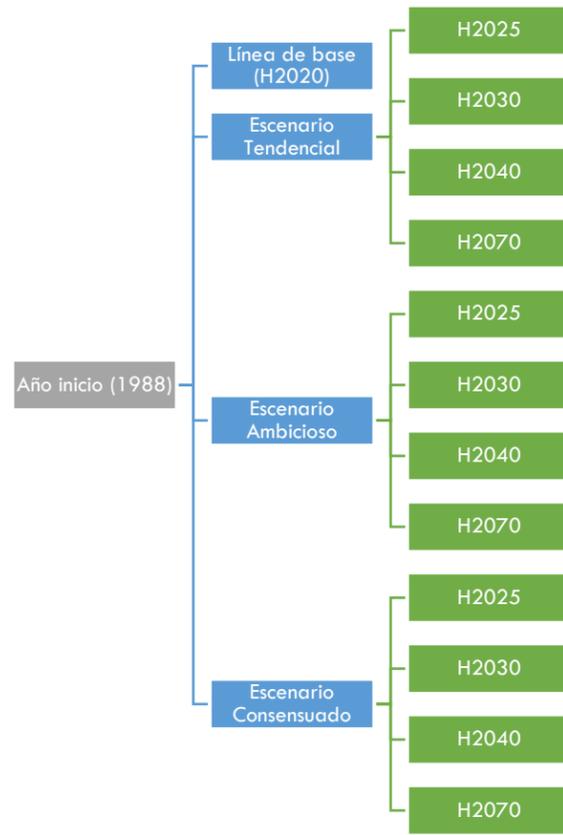
Tabla 2. Dominio y parámetros generales de simulación para el modelo WEAP-CHCP.

Ámbito de simulación	Cuenca Hidrológica del Canal de Panamá y demandas anexas dependientes
Periodo de simulación	1988 – 2018. Año 1988 como calentamiento y resultados referidos al periodo 1989-2018 (30 años)
Resolución temporal	Mensual
Número total de objetos representados	68
Objetos “Río”	10
Objetos “Embalses”	2
Unidades de Demanda	7
Cuencas	10
Conexiones por escorrentía/infiltración	10
Conexiones para “Toma de agua”	7
Conexiones para “Retorno de flujo”	6
Estaciones con mediciones de caudal	7
Nodos auxiliares de “Agua Subterránea”	10

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

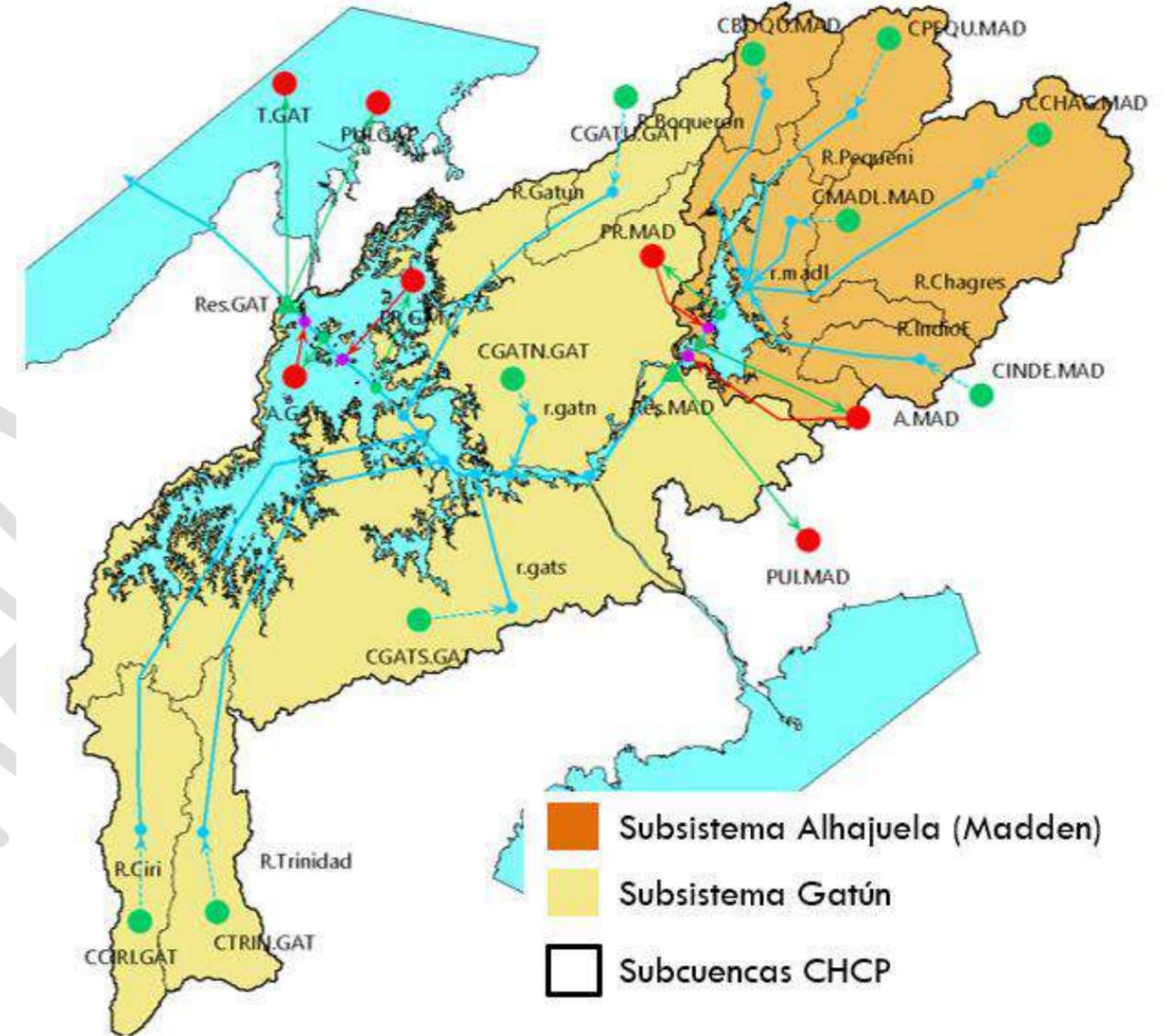
En la siguiente figura se muestra el esquema de simulación adoptado para la fase de prospectiva y de análisis de robustez climática.

Figura 4. Esquema de simulación empleado para la fase de prospectiva del PIOTA.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 5. Esquema topológico del sistema de recursos hídricos de la CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.1.3.1.2 Evaluación de recursos disponibles

Los recursos disponibles en cada subsistema se cuantifican mediante la modelización hidrológica de cada una de las 10 subcuencas² en las que se divide la CHCP (Tabla 3). Para cada subcuenca se ha calibrado y validado un modelo hidrológico agregado utilizando el método del balance de agua en el suelo. En el apartado 2.1.3.2 Generación del modelo hidrológico se detalla el trabajo de calibración y validación para cada una de las subcuencas modelizadas.

Tabla 3. Listado de subcuencas representadas y simuladas en el modelo WEAP-CHCP.

Subsistema	Subcuenca	Superficie (km2)	Tipo	ID_WEAP
Alhajuela	Río Boquerón	90.7	Aforada	CBOQU.MAD
	Río Pequení	144.6	Aforada	CPEQU.MAD
	Río Chagres	406.7	Aforada	CCHAG.MAD
	Río Indio Este	80.4	Aforada	CINDE.MAD
	Madden Local	262.7	No aforada	CMADL.MAD
	Río Cirí Grande	192.5	Aforada	CCIRI.GAT
	Río Trinidad	170.9	Aforada	CTRIN.GAT
Gatún	Río Gatún	118.9	Aforada	CGATU.GAT
	Gatún Norte (tributarios no aforados en el margen derecho)	679.3	No aforada	CGATN.GAT
	Gatún Sur (tributarios no aforados en el margen izquierdo)	733.3	No aforada	CGATS.GAT

Fuente: Equipo PIOTA, 2021, con base en datos de la ACP

2.1.3.1.3 Demandas

Para el cálculo de las demandas por nodo y para cada paso temporal, se ha empleado se tendrán en cuenta tres criterios básicos:

- 1) la actividad anual (medida como unidades equivalentes de demanda),
- 2) una dotación neta de agua por unidad equivalente de demanda, y
- 3) una curva estacional de demanda que simula la distribución de la demanda anual por meses.

La demanda se calcula según:

$$DN_m^i = Na * Da * W_m$$

[Ecuación 1]

Donde DN_m^i es la demanda neta para el nodo de demanda i (e.i. urbana, rural, agropecuario o esclusaje) y el mes m, Na representa la actividad anual en unidades equivalente de demanda (e.i. habitantes, superficie de cultivo en ha., superficie industrial equivalente en ha, número de cabezas de ganado, unidades equivalentes de esclusaje Panamax), Da es el valor dotación volumétrica anual de agua por unidad equivalente de demanda (e.g. m3/ha.año), y Wm es el porcentaje promedio que representa la demanda mensual en el mes m en relación con la demanda anual.

Con la salvedad de la demanda de esclusaje, la cual aplica únicamente al subsistema Gatún, para el resto de las demandas se ha seguido un esquema similar en el que se distinguen tres nodos de demanda consuntiva:

- 1) Demanda Urbana, que incluye la demanda poblacional urbana y la totalidad de la demanda industrial,
- 2) Demanda Rural, para la satisfacción de la demanda de la población en áreas rurales, y
- 3) Demanda Agropecuaria, integrada por la demanda de agua para riego de los cultivos de café y piña de la Cuenca, y la necesaria para cubrir la demanda del hato ganadero.

La demanda hidroeléctrica no se ha incluido en el modelo por tratarse de un uso no consuntivo de baja prioridad en el esquema de asignación de recursos de la CHCP. En cualquiera de los casos, el modelo se ha parametrizado teniendo en cuenta la capacidad máxima de turbinado en cada uno de los subsistemas. La generación de energía hidroeléctrica estaría sujeta los vertidos simulados para cada uno de los embalses de la Cuenca. La demanda concesional de carácter industrial no conectada a la red de abastecimiento se ha considerado despreciable y no se ha tenido en cuenta para la simulación.

A su vez, y de acuerdo con la información recopilada en la fase de diagnóstico, cada nodo de demanda se ha subdividido en diferentes niveles, con el objetivo de representar de la manera más ajustada la complejidad de la Cuenca y las variaciones de valores esperados para los parámetros clave que determinan los requerimientos anuales de agua de un nodo. Ver Anexo 1. Nodos de demanda en modelo WEAP-CHCP.

A continuación, se describe brevemente la metodología empleada para caracterizar cada nodo de demanda. Más detalles y valores concretos se refieren en el apartado 2.4.1.1 Prospectiva de las demandas de agua.

Demanda Urbana (PUI)

Esta demanda incluye dos subunidades de demanda:

- 1) población urbana y suburbana,
- 2) industrial (Tabla 4, Figura 6).

La demanda de la población urbana y suburbana a nivel de subsistema se ingresa en el modelo WEAP a nivel de Zona Poblacional. Los datos de partida son las estadísticas de población anual censados por el INEC para los 59 corregimientos poblacionales clasificados bajo la categoría “urbano-suburbano” en el estudio de STANTEC (2017).

Para cada zona poblacional se ha estimado un valor ponderado de dotación de agua promedio por habitante de acuerdo:

- a) un % de población “urbana” y “suburbana” estimada en cada zona poblacional,
- b) un valor de dotación representativo para cada subtipo de población,
- c) un supuesto que considera la mezcla de un patrón de consumo de agua bajo, medio y alto en cada zona poblacional.

Las estimaciones de dotación también consideran dotaciones unitarias diferentes para la fracción medida y no medida del agua suministrada a través de la red de abastecimiento.

La demanda industrial se ha considerado juntamente con la de la población urbana, asumiéndose que está circunscrita a las zonas urbanas-suburbanas y conectada a la red pública de abastecimiento. Para el cálculo de la demanda se han realizado estimaciones propias de superficie industrial equivalente y, por separado, para el área metropolitana de Colón, área metropolitana de Panamá, y zonas urbanas-suburbanas ubicadas en el resto del territorio de cada

² La denominación de las subcuencas es empleada por la sección de Meteorología e Hidrología (HIAM) de la ACP.

subsistema. Se ha considerado una dotación industrial de partida de 1 l/s/ha como valor recomendable para mantener la actividad.

Finalmente se ha ajustado una curva de demanda mensual de agua que es proporcional al número de días por mes con relación al total de días del año.

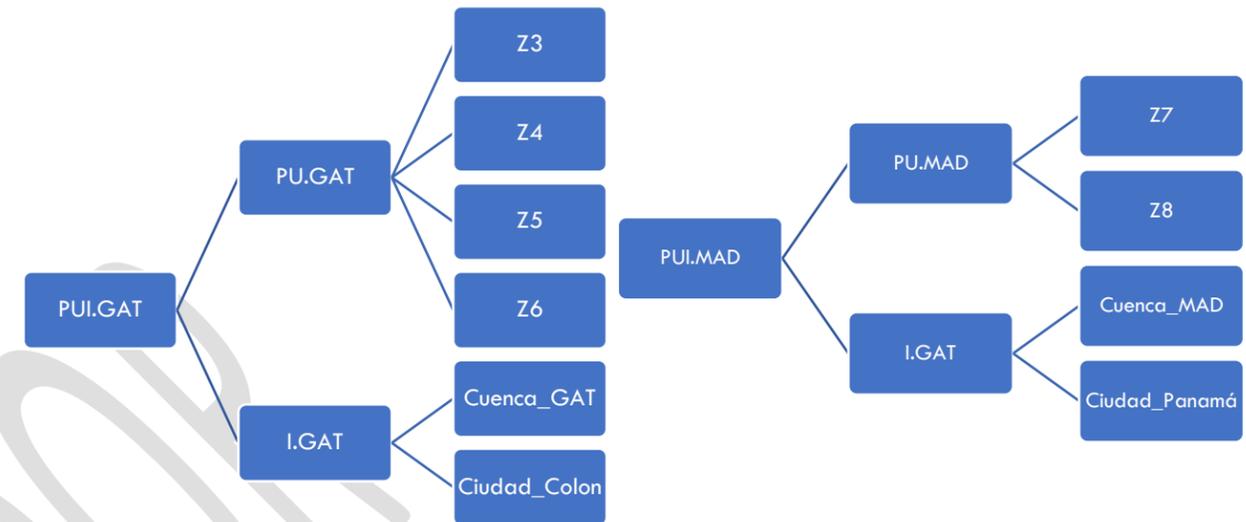
En el modelo WEAP, las tomas de agua para satisfacer la demanda se han ubicado en los respectivos embalses de Gatún y Alhajuela, por lo que el volumen de agua detráido estará sujeto a las fluctuaciones del nivel de agua almacenado en los embalses y sus reglas de operación. Por norma general, estas tomas de agua están asociadas al sistema de potabilización y distribución de agua potable. El flujo máximo que puede circular por la conexión embalse-nodo se ha parametrizado según la capacidad de tratamiento y potabilización total de cada subsistema. Para las pérdidas de agua simuladas en los nodos PUI.GAT y PUI.MAD se han asumido que no retornan a la red hidrológica superficial, y por tanto se anotan como consumos de agua según la terminología de WEAP. Estas pérdidas se simulan como valores ficticios de recarga a un nodo “acuífero” que tiene un carácter auxiliar.

Tabla 4. Caracterización de nodo de demanda poblacional urbano-industrial (PUI) en WEAP-CHCP.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo
Gatún	Población Urbana-Suburbana	Zonal Poblacional 3
		Zonal Poblacional 4
		Zonal Poblacional 5
	Industrial	Zonal Poblacional 6
		Ciudad Colón
		Resto territorio subsistema Gatún
Alhajuela	Población Urbana-Suburbana	Zonal Poblacional 7
		Zonal Poblacional 8
	Industrial	Ciudad Panamá
		Resto territorio subsistema Alhajuela

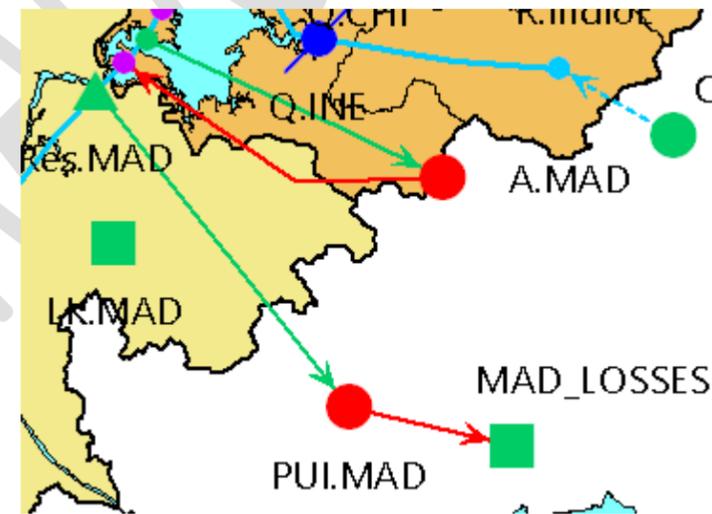
Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 6. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional urbana-industrial para los subsistemas Gatún (PUI.GAT, izqda.) y Alhajuela (PUI.MAD, dcha.)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 7. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda urbana en el subsistema Alhajuela (PUI.MAD) en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Demanda Rural (PR)

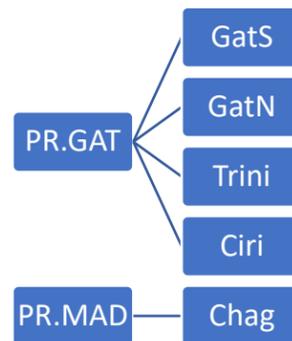
La demanda rural en cada uno de los subsistemas se parametriza de acuerdo con el esquema de la Tabla 5 y Figura 8. La metodología para el cálculo de la demanda rural es similar al empleado para la demanda urbana. En este caso, los datos de población para los 28 corregimientos de población, categorizados como “rurales” según el citado informe de STANTEC, fueron agregados a nivel de subcuenca. La asignación de la dotación por habitante se realizó en base a los datos del estudio de STANTEC (2017).

Tabla 5. Caracterización de nodo de demanda poblacional rural (PR) en WEAP-CHCP.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo
Gatún	Población Rural	Subcuenca Gatún Sur
		Subcuenca Gatún Norte
		Subcuenca Trinidad
		Subcuenca Ciri Grande
Alhajuela	Población Rural	Subcuenca Chagres

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 8. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional rural para los subsistemas Gatún (PR.GAT) y Alhajuela (PR.MAD)

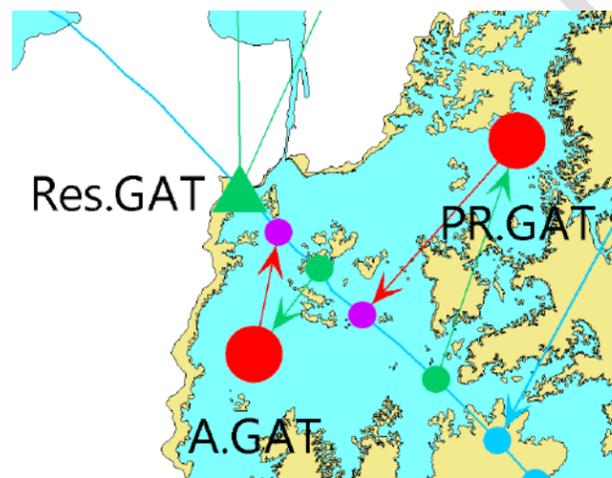


Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Finalmente se ha ajustado una curva de demanda mensual de agua que es proporcional al número de días por mes con relación al total de días del año.

En el modelo WEAP, las tomas de agua para satisfacer la demanda poblacional rural se han ubicado sobre el río correspondiente, justo antes de su interceptación por las presas de los embalses Gatún y Alhajuela. Por tanto, la detracción de agua que se simula a nivel mensual en cada subsistema para satisfacer esta demanda estará influenciado por la suma de los caudales generados en las subcuencas de cabecera. Para las pérdidas de agua simuladas en los nodos PR se ha asumido su retorno a la red hidrológica superficial.

Figura 9. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda rural del subsistema Gatún en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Demanda Agropecuaria

Por representatividad y preponderancia, en términos de superficie cultivada, se han considerado únicamente la piña y el café como cultivos de riego para su modelización en WEAP. Ambos cultivos se analizan conjuntamente bajo un mismo nodo de demanda y para cada subsistema por separado. Las dotaciones de riego para ambos cultivos se obtenido a partir del estudio “Determinación de Balance Hídrico y Caudal Ambiental” (MiAmbiente & ACP, 2017). Igualmente se asigna a cada cultivo una curva de demanda estacional típica teniendo en cuenta las fechas de siembra, cosecha y evolución del coeficiente de cultivo típicos en la región.

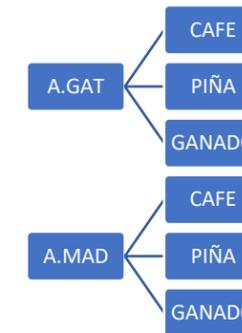
La demanda pecuaria se ha incluido en el nodo como la superficie de pasto equivalente requerida para incluir las necesidades hídricas del hato ganadero y los consumos de agua de las instalaciones anexas. La dotación de agua por superficie equivalente de agua se ha extraído de valores típicos recogidos en la región de estudio.

Tabla 6. Caracterización de los nodos de demanda agropecuaria (A) en WEAP-CHCP.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo
Gatún (A.GAT)	Agrícola	Café Piña
	Pecuario	Pasto
Alhajuela (A.MAD)	Agrícola	Café Piña
	Pecuario	Pasto

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 10. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda agropecuaria (A.GAT y A.MAD)



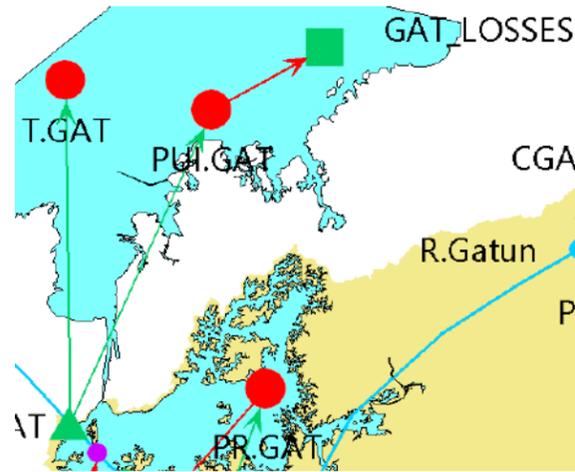
Fuente: Equipo PIOTA, 2021

En ambos subsistemas, la toma de agua para cubrir la demanda agropecuaria se simula sobre el río correspondiente, aguas abajo de la toma destinada a demanda poblacional rural y justo antes de la ubicación del nodo de embalse. También las pérdidas de agua se asumen que retornan a la red hidrológica superficial para ingresar directamente como entradas de agua a los embalses.

Demanda de Esclusaje

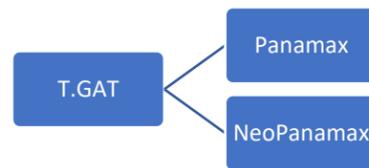
Se trata de una demanda (T.GAT) conectada únicamente al embalse Gatún, y cuya toma está ubicada sobre el nodo de embalse. En este caso, la demanda se caracteriza directamente en términos volumétricos a partir de las Unidades de Esclusajes Panamax Equivalente diarios, unidad que equivale a un volumen de agua de 55 millones de galones por día. Los datos de esclusajes equivalentes se ingresan en el modelo WEAP desagregados para la demanda de buques Panamax y NeoPanamax, respectivamente.

Figura 11. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda de esclusaje en el subsistema Gatún (T.GAT) en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 12. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda de esclusaje (T.GAT)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.1.3.1.4 Pérdidas y retornos

En el modelo WEAP-CHCP se han considerado las pérdidas de agua acontecidas para para los nodos de demanda urbana y rural, y agropecuaria. Las pérdidas se parametrizan como tasas porcentuales respecto de la demanda total de cada nodo. WEAP utiliza estos valores de pérdida para calcular el requerimiento de suministro, esto es el volumen de agua necesario cubrir la demanda de agua del nodo, según la ecuación.

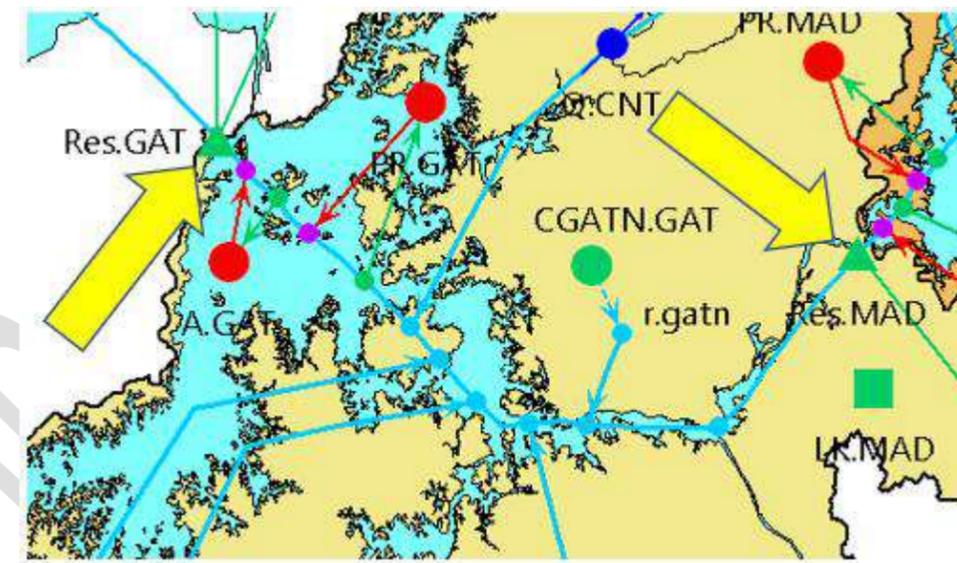
$$RS_m^i = 100 * \frac{DN}{(100-P)} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde RS_m^i es el requerimiento de suministro en el mes m para el nodo de demanda i , DN es la demanda neta anual (ver [Ecuación 1]).

2.1.3.1.5 Embalses

En el modelo WEAP-CHCP se ha incluido dos nodos tipo “embalse” (embalse Gatún -Res.GAT- y embalse Alhajuela -Res.MAD-, Figura 13) para simular el régimen de almacenamiento, regulación y provisión de agua a demandas urbana y de esclusaje, y vertidos en la Cuenca.

Figura 13. Ubicación de los embalses Gatún y Alhajuela en el esquema topológico del modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Cada embalse se ha parametrizado en base a información relativa a sus características físicas, las reglas de operación que regulan los vertidos, y el criterio de prioridad de llenado que determina el grado de prioridad asignado al llenado del embalse frente al abastecimiento de los nodos de demanda.

Tabla 7. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.

Parámetro	Descripción
<i>Parámetros físicos</i>	
Capacidad de almacenamiento	Capacidad total de almacenamiento
Almacenamiento al inicio del periodo de simulación	Inicialización. Dato medido en enero de 1988.
Curva de Elevación-Volumen	Determina la relación entre la altura de la lámina de agua y el volumen total embalsado.
Evaporación neta	Diferencia entre la precipitación directa sobre espejo de agua del embalse y la evaporación directa. Los datos se dan en valores de lámina de agua (mm) de acuerdo con las series de datos meteorológicos utilizados para forzar el modelo de simulación.
Máximo efluente hidráulico	Máximo caudal que puede verse aguas abajo debido a las restricciones hidráulicas del embalse
Pérdidas de fondo o laterales	Volumen de agua infiltrado por el fondo. En modelo WEAP-CHCP, las pérdidas de fondo se retornan a la red superficial aguas debajo de la presa a través de un nodo "acuifero" que se utiliza como nodo auxiliar.
<i>Parámetros de operación</i>	
Nivel superior de conservación (en volumen)	Volumen máximo de agua que puede almacenarse dejando un margen para control de inundaciones. En el modelo WEAP-CHCP, estos datos se configuran mensualmente de acuerdo con la curva de vertido de cada embalse
Nivel superior de amortiguamiento	Volumen de embalse por debajo del cual, los vertidos se restringen de acuerdo con un coeficiente de amortiguación. En el modelo WEAP-CHCP, estos datos se configuran mensualmente de acuerdo con la curva guía de operación de cada embalse
Volumen muerto	Volumen de embalse no disponible para asignación.
Coefficiente de amortiguamiento	Representa la tasa de vertido que debe aplicarse cuando el nivel de embalse está por debajo del nivel superior de amortiguamiento. Se aplica sobre el volumen efectivo disponible.
<i>Parámetros para generación hidroeléctrica</i>	
Máximo caudal de turbinado	Máximo caudal turbinable en m ³ /s
Nivel de turbinado	Nivel sobre el que empieza a turbinarse
<i>Prioridad de llenado</i>	Nivel de prioridad entre almacenamiento/llenado y vertido/abastecimiento. 1 = mayor prioridad para llenado, 99 = mayor prioridad para abastecimiento.

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Dos parámetros, el coeficiente de amortiguamiento y el nivel de prioridad de llenado, han recibido especial atención. Su determinación ha estado sujeta a un proceso de calibración por tanteo donde se analizó la bondad del ajuste y correlación temporal entre los valores de vertido observados y los simulados en ambos embalses en el periodo 1988-2019 (condición de línea de base). En ambos casos, se encontró un juego de valores que simulaba de manera satisfactoria la dinámica de niveles y vertidos en ambos embalses.

2.1.3.2 Generación del modelo hidrológico

La ACP cuenta en la actualidad con tres modelos hidrológicos diferentes cada uno orientado a cumplir un objetivo particular. Sin embargo, ninguno de estos modelos permite su utilización directa sobre el modelo de oferta-demanda que se desarrollado sobre el WEAP. Por lo tanto, se opta por crear un modelo específico adecuado a las necesidades de la presente consultoría.

2.1.3.2.1 Modelo y método hidrológico empleado

Selección del modelo hidrológico

El análisis oferta-demanda debe incluir un cálculo o submodelo hidrológico de resolución suficiente para determinar la oferta hídrica, capaz de simular y generar la serie de caudales en las diferentes subcuencas que componen el sistema. Por ello, siguiendo la tendencia de las herramientas hidrológicas existentes, se ha optado por generar un modelo específico enfocado a su uso concreto en el modelo global oferta-demanda WEAP.

El propio software WEAP cuenta con un módulo de cálculo hidrológico siendo esta la opción empleada frente a la posibilidad de crear un modelo externo cuyos resultados debieran posteriormente introducirse en como input en WEAP. Los motivos principales para emplear el módulo del WEAP son la facilidad de integración, que permitirá a la ACP disponer de todas las utilidades del modelo oferta-demanda en una única herramienta, y por supuesto el hecho de que el propio modulo hidrológico del WEAP es perfectamente adecuado para cumplir el objetivo de determinar la oferta hídrica. En cualquier caso, previa a su utilización en el análisis oferta-demanda se deben ajustar los parámetros del submodelo hidrológico empleado, para que se asemejen al resto de información hidrológica disponible, principalmente en lo relativo a los datos de caudal medidos en las estaciones hidrométricas así como en los volúmenes globales en los embalses.

El módulo hidrológico del WEAP a su vez permite emplear varios métodos de cálculo orientados a los diferentes usos para los cuales suele emplearse los modelos oferta-demanda:

- Método del coeficiente simplificado en demandas de riego: calcula la evapotranspiración de la cuenca, sin simular procesos de escorrentía o infiltración, estando orientado su uso en modelos enfocados a modelos de demanda de riego.
- Método del coeficiente simplificado: similar al anterior, pero añadiendo un reparto proporcional entre escorrentía y flujo subterráneo de las precipitaciones no consumidas por la evapotranspiración.
- Método MABIA (FAO56): enfocado a simular las necesidades y programación de la irrigación mediante la simulación de la transpiración, evaporación, el crecimiento de los cultivos y sus rendimientos.
- Método del desarrollo de las plantas: simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua y el rendimiento, siendo desarrollado para estudiar los impactos de la alteración de la concentración atmosférica de CO₂, el estrés de la temperatura, la variabilidad de la duración de la temporada y el estrés hídrico en el uso del agua de las plantas y el rendimiento de los cultivos.
- Método de la humedad del suelo o escurrimiento de lluvia: en el cual además de la evapotranspiración se simula los procesos de escorrentía e infiltración, para lo cual se requiere una parametrización más amplia del suelo y mayor número de datos climáticos.

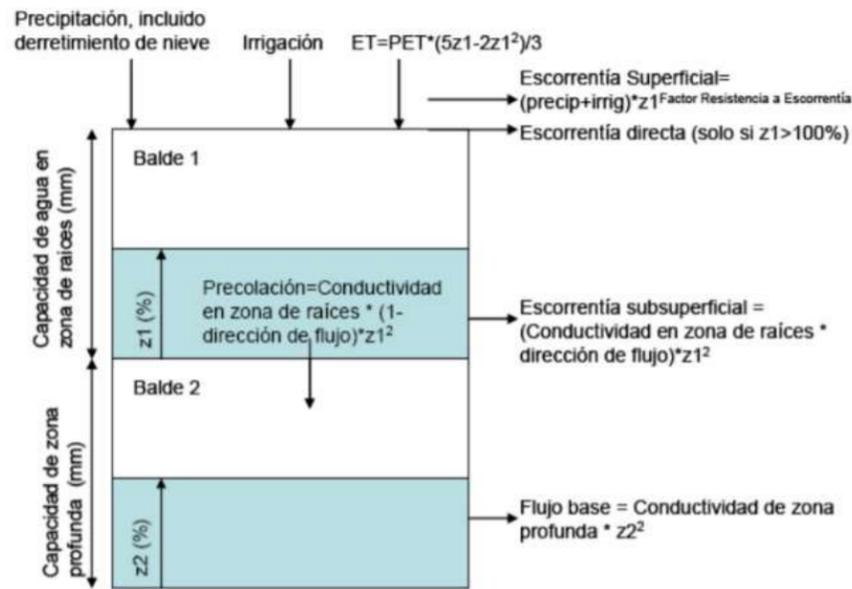
De entre estos se emplea el método de la humedad del suelo por tratarse del más completo y que mejor simula los diferentes procesos del ciclo hidrológico.

Descripción del método hidrológico

Se trata de un método hidrológico de precipitación-escorrentía basado en la humedad del suelo. Conceptualmente es un método cuasi-físico unidimensional en el cual se concibe el suelo como dos baldes de balance de agua para

cada tipo de cobertura o uso del suelo que representan los diferentes fenómenos en la cuenca, repartiendo el agua entre escorrentía superficial, evapotranspiración, infiltración, flujo base y percolación.

Figura 14 Método hidrológico de WEAP



Fuente: weap21.org

La ecuación del balance de masa del modelo hidrológico empleado (Yates et al. 2005), mostrado en la figura anterior, describe de manera empírica los procesos que intervienen a partir de los parámetros de usos del suelo. Las ecuaciones son:

- Tanque superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)K_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_s z_{1,j}^2$$

- Tanque inferior:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{2,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{1,j}^2$$

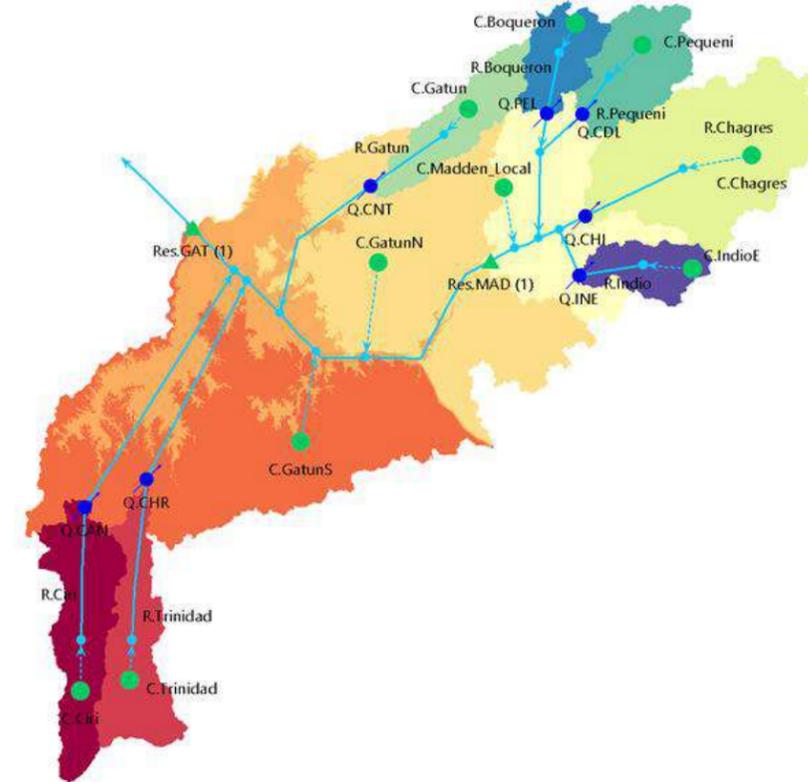
Los valores de cada área se agregan a nivel de subcuenca. A cada subcuenca se le debe aplicar un conjunto homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y una distribución por tipos de cobertura/ usos del suelo. El programa calcula mediante un algoritmo de programación lineal que optimiza los recursos disponibles para maximizar la satisfacción de la demanda, según las restricciones de operación y normas de prioridad y preferencia.

Montaje inicial del modelo

Como se ha explicado anteriormente el cálculo hidrológico estará integrado en el modelo global de oferta-demanda desarrollado sobre el WEAP. Por lo tanto, el cálculo hidrológico partirá del esquema general de cuencas empleado por el WEAP que a su vez ha sido previamente pensado para poder integrar las diferentes disciplinas involucradas en el análisis oferta-demanda. La CHCP va a modelar a escala de subcuencas formada por las subcuencas aforadas

mediante estaciones hidrométricas y las cuencas directas al embalse de Alajuela y al embalse Gatún por cada una de las vertientes norte y sur de la Cuenca.

Figura 15 Esquema topológico del módulo hidrológico en WEAP



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Sobre este esquema se introducen los diferentes datos requeridos para el cálculo hidrológicos principalmente de tipo climático y de caracterización del terreno a través de parámetros. Una vez se tienen todos los datos necesarios para el cálculo hidrológico se procede al ajuste de los parámetros de las cuencas de cabecera aforadas de cabecera mediante la comparación con los caudales y volúmenes registrados en las estaciones de aforo. En estas cuencas el proceso de ajuste es hidrológico puesto que en ellas pesa principalmente la oferta hídrica respecto al volumen de demanda.

Posteriormente, en las cuencas locales de los embalses se aplican ajustes de los parámetros hidrológicos basados en los resultados de las cuencas de cabecera. Con el submodelo hidrológico ajustado se incluirá en el cálculo las demandas actuales del sistema completo de la Cuenca, para finalmente realizar una comparación global del balance hídrico respecto a los datos disponibles en los embalses.

2.1.3.2.2 Procedencia y tratamiento de los datos

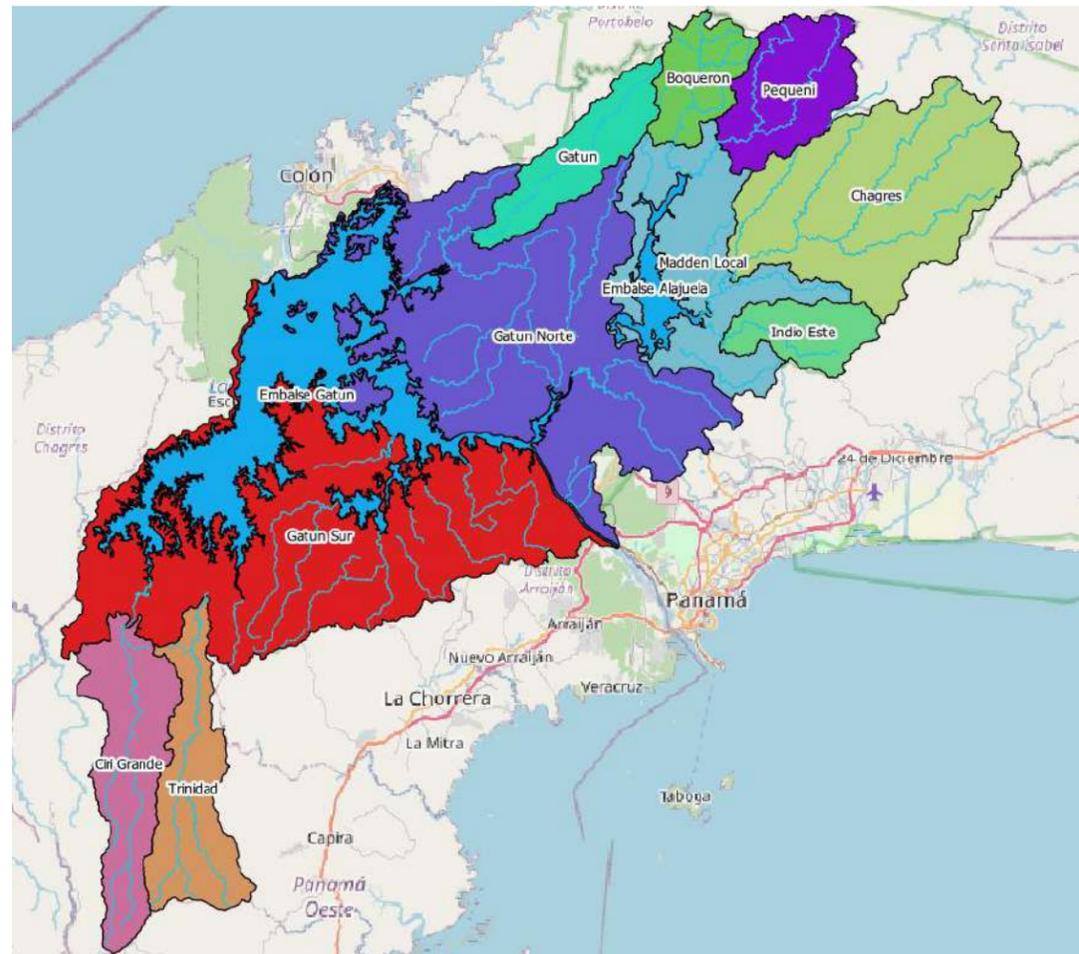
El modelo hidrológico precisa varios tipos de información, datos físicos de las subcuencas (superficie y latitud), datos climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), datos hidrométricos (caudales) y parámetros de caracterización del terreno relacionados con los diferentes procesos físicos a simular: evapotranspiración, escorrentía, infiltración, etc.

Datos físicos

El primer grupo de datos necesarios para el cálculo hidrológico son relativos a la descripción física de la cuenca en cuanto a sus dimensiones y localización. En concreto se requiere datos de superficie y latitud de cada subcuenca.

La delimitación de la cuenca, así como la división en subcuencas parte de la información geográfica (capa en formato *shapefile*) facilitada por la ACP. Esta división ya tiene en cuenta los puntos de control (estaciones hidrométricas) existentes en los principales cauces de la Cuenca y, por tanto, es un esquema óptimo para la calibración del modelo hidrológico. Tan solo se ha realizado un ajuste sobre esta base para incluir las principales islas existentes en el embalse Gatún (Barro colorad, Tigre, Puma, Pantera, Lion Hill, etc.) dentro del área de la subcuenca directa de Gatún Norte.

Figura 16 Delimitación de subcuencas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

A partir de esta delimitación y mediante herramientas GIS se han obtenido los datos de superficie y latitud media. La siguiente tabla muestra los valores resultantes en cada subcuenca:

Tabla 8. Área y latitud de cada subcuenca

Subcuencas	Área (km2)	Latitud
Boquerón	90.65	9.4416

Subcuencas	Área (km2)	Latitud
Pequeni	144.58	9.4307
Chagres	406.71	9.3353
Indio Este	80.42	9.2122
Madden Local	262.74	9.2746
Gatún	118.84	9.3714
Gatún Norte	703.53	9.2094
Ciri Grande	192.52	8.8246
Trinidad	170.89	8.8025
Gatún Sur	733.34	9.0299

Fuente: Equipo PIOTA, 2021, con base en datos de la ACP

El dato de la superficie es empleado por el módulo hidrológico para el cálculo de la precipitación total y los consiguientes procesos hidrológicos, mientras que la latitud influye principalmente en la radiación solar empleada en el cálculo de la evapotranspiración.

Cabe destacar que dentro del propio WEAP estos dos datos no se engloban dentro de una sección específica relativa a datos físicos, sino que el dato de superficie se integra dentro de la sección de “usos del suelo”, mientras que la latitud se recoge en la sección de “clima”.

Datos climatológicos/hidrológicos

En este apartado se incluyen todos los datos relativos al comportamiento hidrológico climático de la Cuenca. Para simular el proceso hidrológico en las subcuencas, el *software* requiere de datos de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los dos primeros son datos de importancia prioritaria para el cálculo, por lo que se recomienda disponer de datos disgregados a la escala temporal empleada, en este caso datos mensuales para todo el periodo de simulación, y representativos de cada subcuenca. Mientras que, la humedad relativa y la velocidad del viento tienen una importancia secundaria y, por tanto, será suficiente con disponer de valores representativos de un año medio en toda la Cuenca.

Por su parte, para la calibración del modelo, se requieren datos de caudales aforados para un periodo suficientemente largo como para permitir la comparación con los resultados simulados. En este caso, se dispone de estaciones hidrométricas de los principales cauces de la Cuenca, que serán empleados como principal fuente de comparación en el ajuste del modelo. A continuación, se detalla el proceso de análisis y tratamiento de cada uno de los datos:

1. Precipitación

La precipitación es el dato fundamental para conocer la cantidad de agua disponible en la Cuenca. A partir de la precipitación bruta caída sobre la Cuenca, y mediante el cálculo hidrológico, se obtiene la precipitación neta, tras la abstracción de pérdidas y la simulación del balance hidrológico completo para, finalmente, obtener la oferta hídrica de la Cuenca.

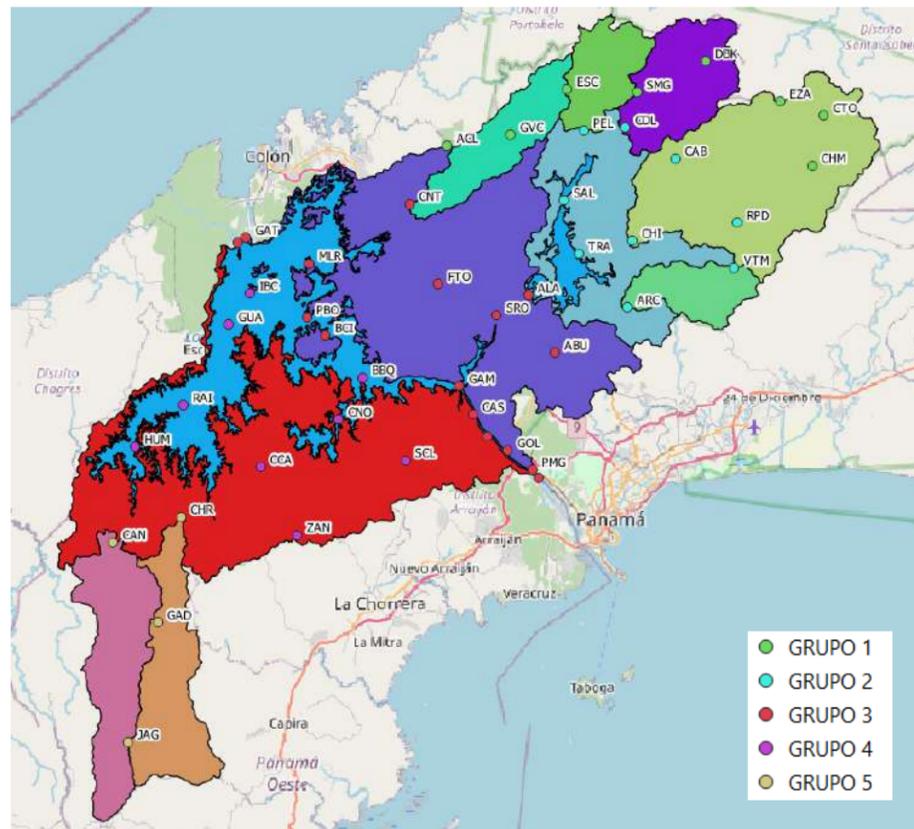
Se dispone de datos de precipitación mensual, facilitados por la ACP, de las 46 estaciones hidrometeorológicas situadas en la Cuenca. Para todas estas estaciones se dispone de una serie completa, desde febrero del año 1972 hasta enero de 2019, si bien se van a emplear únicamente aquellos datos coincidentes con el periodo de simulación seleccionado, es decir, 1988-2018.

Previo a la utilización de la información, se realiza un análisis básico de los datos mediante la obtención de estadística de los datos y el método de las dobles acumulaciones o dobles masas. Para ello, en primer lugar, se agrupan las

estaciones en conjuntos homogéneos, atendiendo a su situación física (localización y altura) y sus características pluviométricas (precipitación media anual y coeficiente de variación). Así se obtienen cinco grupos que por su localización pueden describirse como:

- Grupo 1: Estaciones situadas en la cabecera de la vertiente norte, situadas mayormente a cotas altas.
- Grupo 2: Estaciones situadas a cotas medias de la vertiente norte, situadas en los alrededores de la cuenca aferente al embalse de Alajuela.
- Grupo 3: Estaciones situadas a cotas bajas de la vertiente norte, situadas principalmente en la subcuenca de Gatún Norte.
- Grupo 4: Estaciones situadas a cotas bajas de la vertiente sur, situadas principalmente en la subcuenca de Gatún Sur.
- Grupo 5: Estaciones situadas en la cabecera de la vertiente sur, situadas mayormente a cotas medias y altas.

Figura 17 Agrupación estaciones homogéneas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Posteriormente, en cada uno de estos grupos se selecciona una estación de referencia, cuya ubicación y datos tengan valores intermedios respecto al resto de su grupo.

En la siguiente tabla se muestran las características de las estaciones y su organización por grupos, resaltando la estación de referencia:

Tabla 9. Grupos homogéneos y estación de referencia

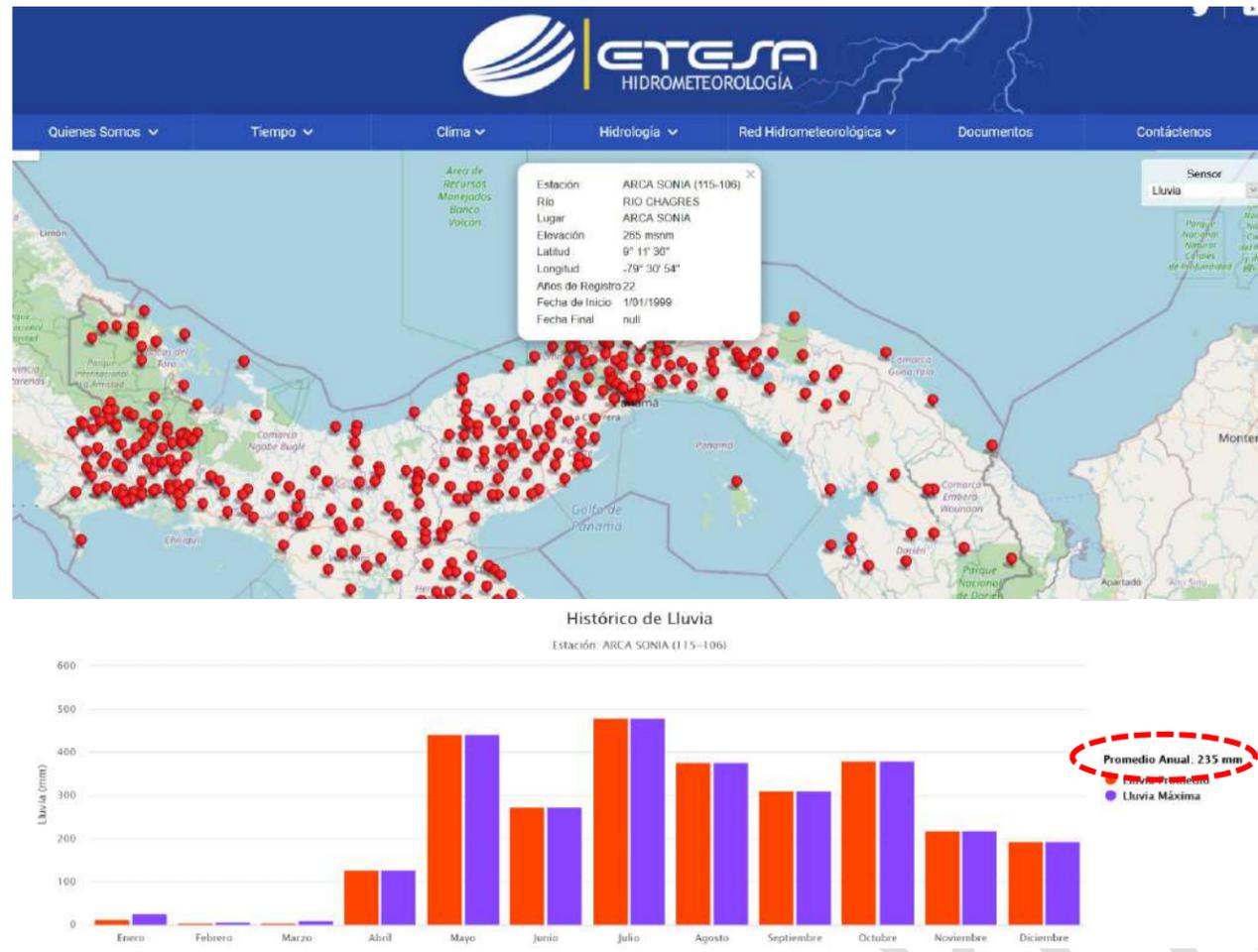
Código	Nombre estación	Altura (m)	Promedio anual	Coef. Variación	Grupo
ACL	Agua Clara	460	3713.41	0.1896	Grupo 1
CHM	Chamón	640	3748.78	0.1998	Grupo 1
CTO	Chagrecito	490	7197.37	0.1739	Grupo 1
DBK	Dos Bocas	229	4858.79	0.1882	Grupo 1
ESC	Escandalosa	480	3414.03	0.1748	Grupo 1
EZA	Esperanza	552	4825.34	0.2009	Grupo 1
SMG	San Miguel	520	3984.59	0.1911	Grupo 1
GVC	Valle Central de Río Gatún	253	2570.04	0.2271	Grupo 1
ARC	Arca Sonia	265	8106.29	0.2021	Grupo 2
CAB	Chico Cabecera	340	3422.67	0.2109	Grupo 2
CDL	Candelaria	98	3240.26	0.1887	Grupo 2
CHI	Chico	104	2674.42	0.1742	Grupo 2
PEL	Peluca	107	3000.59	0.2035	Grupo 2
RPD	Río Piedras	192	2679.02	0.2038	Grupo 2
SAL	Salamanca	82	2343.60	0.2332	Grupo 2
TRA	Tranquilla	64	2562.12	0.1872	Grupo 2
VTM	Vistamares	969	3038.11	0.1946	Grupo 2
ALA	Alhajuela	40	2295.78	0.1714	Grupo 3
BCI	Barro Colorado	34	2552.72	0.2514	Grupo 3
ABU	Buenos Aires	125	2520.00	0.1849	Grupo 3
CAS	Cascadas	47	2218.65	0.1444	Grupo 3
CNT	Ciento	38	2963.89	0.1852	Grupo 3
EMH	Empire Hill	61	2119.49	0.1747	Grupo 3
FTO	Frijolito	349	2297.37	0.1816	Grupo 3
GAM	Gamboa	31	2132.03	0.1603	Grupo 3
GAT	Gatún	31	2816.11	0.1622	Grupo 3
GOL	Gold Hill	180	1940.81	0.1861	Grupo 3
GTW	Gatún West	33	2781.18	0.1771	Grupo 3
MIR	Miraflores	20	2084.21	0.1604	Grupo 3
MLR	Monte Lirio	34	2752.72	0.2039	Grupo 3
PBO	Punta Bohía	25	2551.48	0.2270	Grupo 3
PMG	Pedro Miguel	31	2135.44	0.1218	Grupo 3
SRO	Santa Rosa	28	2360.53	0.1800	Grupo 3
BBQ	Barbacoa	53	2390.99	0.2145	Grupo 4
CCA	Cerro Cama	120	2287.17	0.1910	Grupo 4
CNO	Caño	33	2149.54	0.1953	Grupo 4
GUA	Guacha	29	2275.37	0.2320	Grupo 4
HUM	Humedad	31	2406.04	0.1919	Grupo 4
IBC	Isla Bruja Chiquita	24	2437.36	0.2242	Grupo 4
RAI	Las Raíces	34	2248.45	0.2207	Grupo 4
SCL	Santa Clara	102	2288.77	0.1831	Grupo 4
ZAN	Zanguenga	112	2135.96	0.1816	Grupo 4
CAN	Los Cañones	104	2553.68	0.1874	Grupo 5
CHR	El Chorro	43	2192.17	0.1893	Grupo 5
GAD	Gasparillal	346	2229.69	0.1950	Grupo 5
JAG	Jagua	546	2772.64	0.1771	Grupo 5

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP

Del análisis estadístico básico de los datos, tan solo se observa una discrepancia relevante en la precipitación media de la estación de Arca Sonia (ARC): esta presenta un valor muy elevado, respecto al resto de estaciones de su grupo, y que no justifica ni su localización ni su altura. Para contrastar este dato se acude a la información disponible en la página web de ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>) donde se encuentra un resumen del histórico de lluvia de esta estación. Según esta información la estación de Arca Sonia tiene una precipitación media mensual

de 235 mm (2.820 mm al año) mientras que el valor obtenido de los datos disponibles es de 8.1060 mm al año (que supone un promedio de 676 mm al mes). Por lo tanto, se decide no emplear la estación Arca Sonia en el cálculo de la precipitación areal de cada subcuenca.

Figura 18 Datos de precipitación en la estación Arca Sonia de ETESA



Fuente: ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>)

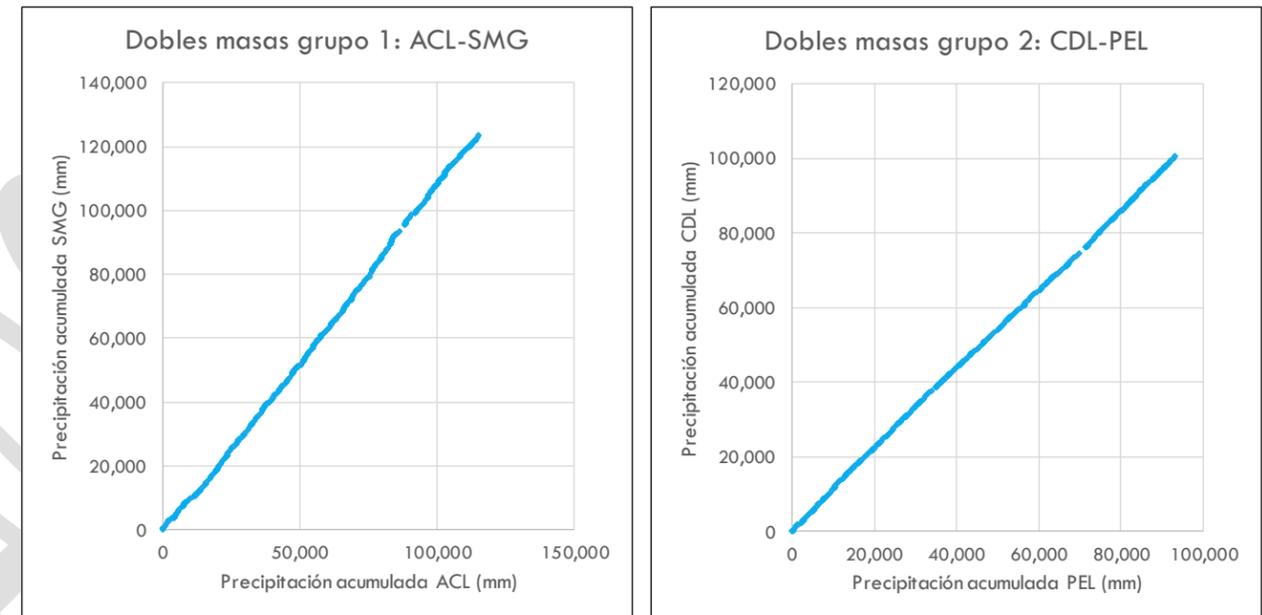
Para reforzar esta decisión, se ha realizado un ejercicio adicional consisten en calibrar la subcuenca del Indio Este (única subcuenca aforada afectada por el área de influencia de la estación Arca Sonia), considerando los valores de precipitación de esta estación y sin considerarla. La variación de parámetros necesaria, para alcanzar un resultado satisfactorio de calibración, con los datos de precipitación de la estación y sin ella; y, a su vez, comparando respecto a la variación de los parámetros de las subcuencas vecinas, muestran efectivamente una discordancia. En concreto, si se emplean los datos de la estación Arca Sonia, se requiere aumentar entre un 250% y 300% el valor inicialmente estimado del parámetro del suelo Kc (coeficiente de cultivo); mientras que, si no se emplea la estación, el porcentaje de variación es del -5%. En las subcuencas vecinas este coeficiente una vez calibrado varía entre un -25% y un 35%.

Finalmente se aplica el método de las dobles masas, comprobando el ajuste de la precipitación media de cada estación, respecto a la estación de referencia de su grupo. El método se basa en la premisa de que la precipitación acumulada de una estación, respecto a otra estación de características homogéneas, presenta una relación lineal a lo largo del tiempo. De este modo se pueden evidenciar errores de varios tipos (mediciones puntuales incorrectas,

errores sistemáticos en la medición, cambios de localización o condiciones de una estación, etc.), eliminar datos incorrectos e incluso corregir esta información.

Se realizan las gráficas, en cada uno de los grupos, acumulando la precipitación mensual para el periodo de simulación. El análisis de los resultados muestra una buena tendencia lineal en todas las estaciones, lo que permite validar los datos de precipitación de todas las estaciones.

Figura 19 Ejemplo gráficos dobles masas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP

El reparto espacial de la precipitación se obtiene mediante la utilización del método de los polígonos de Thiessen, el cual permite establecer los porcentajes de influencia de las estaciones, sobre cada subcuenca, por un criterio de cercanía. Los coeficientes de Thiessen se obtienen como relación de la superficie del polígono correspondiente dentro de la subcuenca, respecto a la superficie total de la subcuenca. Posteriormente, la precipitación a aplicar, en cada subcuenca, será el resultado de ponderar los valores de precipitación, de cada estación, por su porcentaje de influencia.

$$P_m = \sum \frac{A_i}{A} * P_{i,m} = \frac{A_1}{A} * P_{1,m} + \frac{A_2}{A} * P_{2,m} + \frac{A_3}{A} * P_{3,m} + \dots$$

Donde:

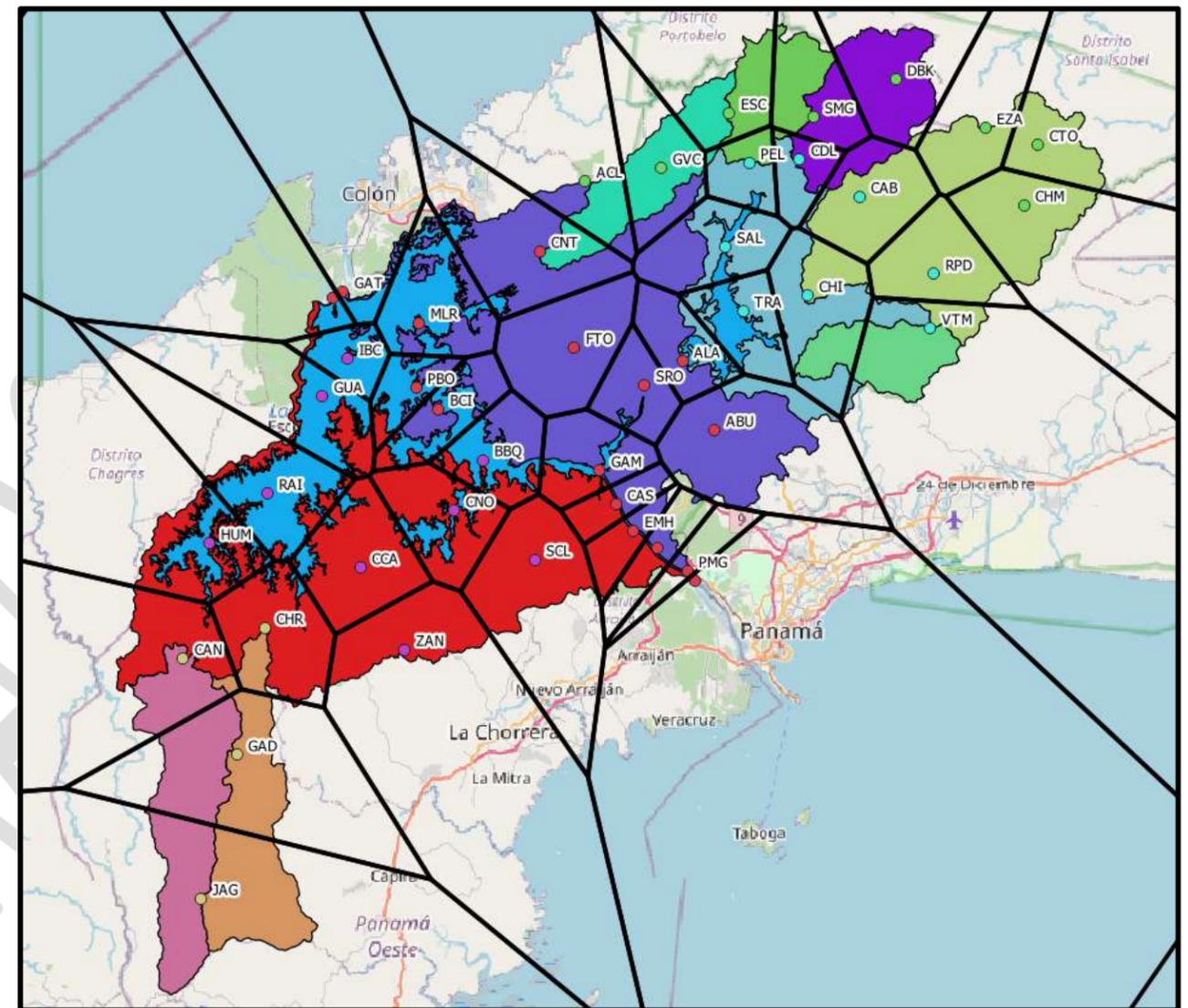
- Pm es la precipitación media ponderada del mes m en la subcuenca considerada.
- Pi la precipitación en la estación i el mes m
- A la superficie total de la subcuenca
- Ai la superficie del polígono de la estación i

Tabla 10. Coeficiente de Thiessen por subcuenca

CÓDIGO	Boquer	Peque	Chagre	Indio	Madden	Gatún	Gatún	Cirí	Trinida	Gatún
ACL	-	-	-	-	0.04600	-	0.06271	-	-	-
ALA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ARC	-	-	-	-	-	-	0.04151	-	-	0.02573
BBQ	-	-	-	-	-	-	0.04567	-	-	0.00979
BCI	-	-	-	-	0.07032	-	0.16193	-	-	-
ABU	-	0.1061	0.1946	-	0.01015	-	-	-	-	-
CAB	-	-	-	-	-	-	-	0.23286	0.0204	0.08412
CAN	-	-	-	-	-	-	0.02186	-	-	0.02471
CAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14317
CCA	0.0198	0.1156	-	-	0.08531	-	-	-	-	-
CDL	-	-	0.0623	0.3066	0.26979	-	-	-	-	-
CHI	-	-	0.2209	-	-	-	-	-	-	-
CHM	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0854	0.12684
CHR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10367
CNO	-	-	-	-	-	0.1296	0.14083	-	-	-
CNT	-	-	0.1358	-	-	-	-	-	-	-
CTO	0.0001	0.5460	0.0037	-	-	-	-	-	-	-
DBK	-	-	-	-	-	-	0.01203	-	-	0.03292
EMH	0.3844	-	-	-	-	0.2270	-	-	-	-
ESC	-	0.0003	0.1198	-	-	-	-	-	-	-
EZA	-	-	-	-	-	-	0.17276	-	-	-
FTO	-	-	-	-	-	-	-	0.36563	0.3718	0.00049
GAD	-	-	-	-	-	-	0.06586	-	-	0.02356
GAM	-	-	-	-	-	-	0.00570	-	-	0.00001
GAT	-	-	-	-	-	-	0.01221	-	-	0.01456
GOL	-	-	-	-	-	-	0.00037	-	-	0.00343
GTW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03298
GUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07878
HUM	-	-	-	-	-	-	0.00276	-	-	0.00154
IBC	-	-	-	-	-	-	-	0.40151	0.5223	-
JAG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00001
MIR	-	-	-	-	-	-	0.05999	-	-	-
MLR	-	-	-	-	-	-	0.01447	-	-	0.00806
PBO	0.1429	-	-	-	0.10804	0.0115	0.00001	-	-	-
PEL	-	-	-	-	-	-	0.00354	-	-	0.00151
PMG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03240
RAI	-	-	0.2197	-	0.00003	-	-	-	-	-
RPD	-	-	-	-	0.17863	-	0.05024	-	-	-
SAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13904
SCL	0.4525	0.2318	-	-	-	-	-	-	-	-
SMG	-	-	-	-	-	-	0.07683	-	-	-
SRO	-	-	-	-	0.16700	-	0.00039	-	-	-
TRA	-	-	-	-	0.00739	0.4106	0.02451	-	-	-
GVC	-	-	0.0428	0.6933	0.05736	-	-	-	-	-
VTM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11268
ZAN	-	-	-	-	0.04600	-	0.06271	-	-	-

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

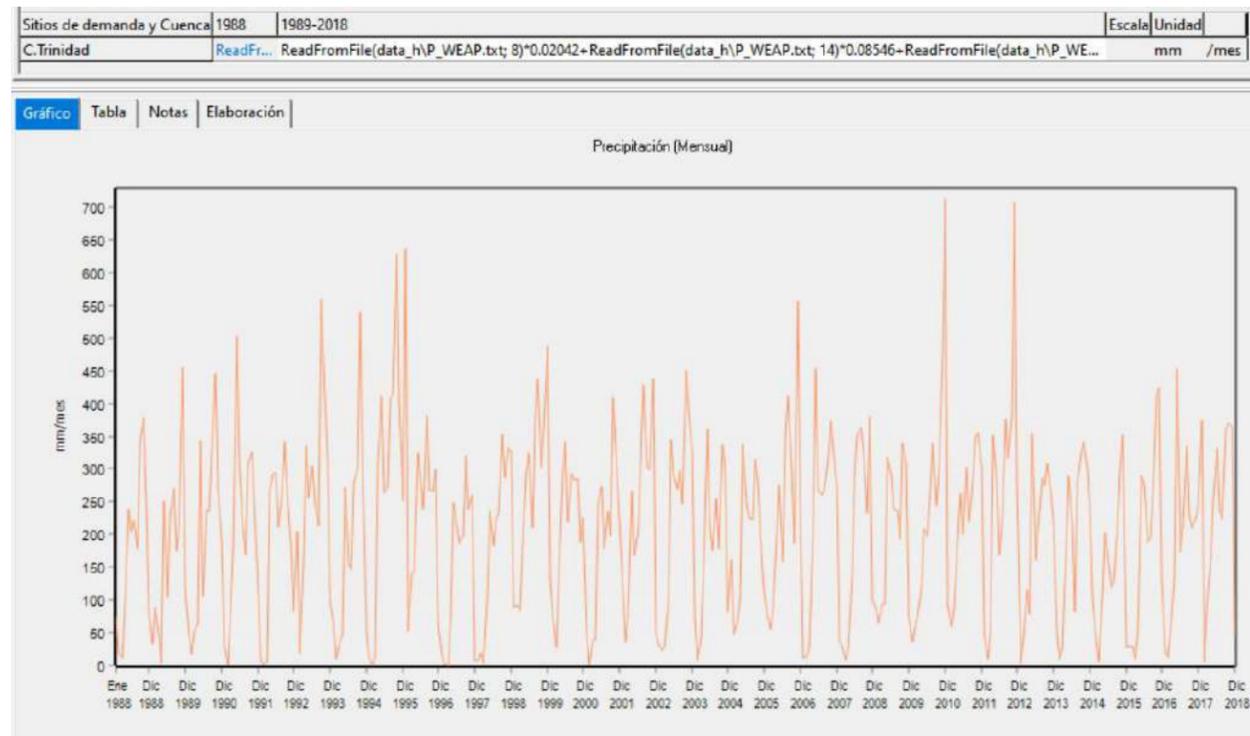
Figura 20 Polígonos de Thiessen



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

La precipitación de cálculo se obtiene directamente, dentro del WEAP, mediante la programación de la fórmula anterior en cada subcuenca; haciendo referencia a un archivo global, con las precipitaciones por estación de la serie completa. De este modo, el programa se encarga de obtener la serie de precipitación areal, ponderada mes a mes, a lo largo de todo el periodo de estudio. Este cálculo, dentro del WEAP, permitirá en el futuro emplear el mismo modelo para calcular otros periodos de simulación o ampliar la serie a futuros registros, con tan solo actualizar el archivo global de precipitaciones.

Figura 21 Serie de precipitación areal 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP



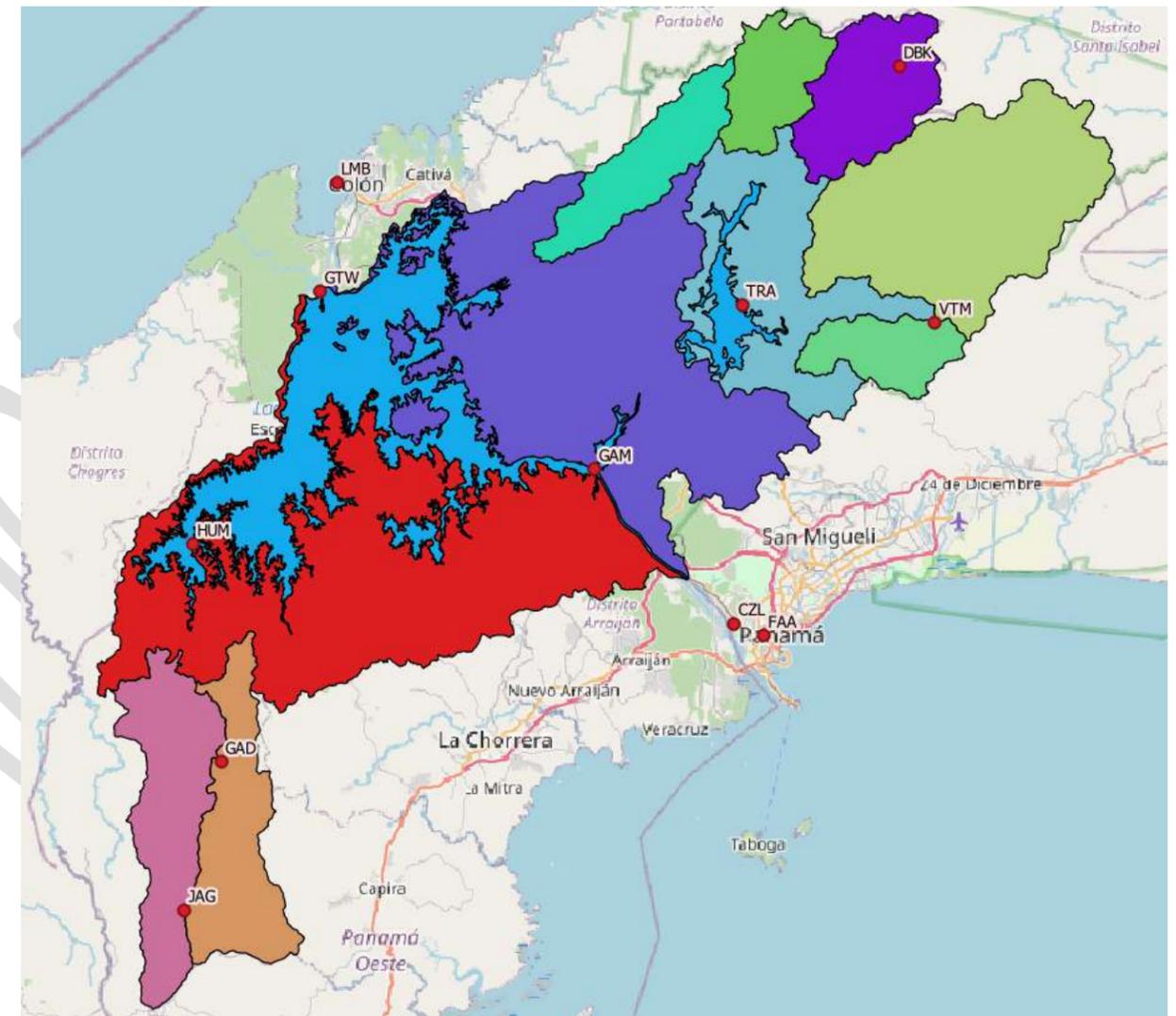
Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2. Temperatura

La temperatura es el segundo dato en importancia, a la hora de realizar un cálculo hidrológico del recurso disponible. A través de la serie de temperaturas, se obtienen una de las principales pérdidas por evapotranspiración.

Se dispone de los datos, facilitados por la ACP, de 11 estaciones con mediciones de temperatura, situadas dentro de la Cuenca o en sus cercanías. Se trata de datos de temperatura media con una periodicidad de medición general horaria que, en algunos años y estaciones, disminuye hasta duraciones diezminutales. En el caso de la temperatura, las series disponibles no son completas ni homogéneas, en cuanto al periodo de medición. Si bien, alguna de las estaciones dispone de datos desde año 1975 al año 2020, en otras estaciones no se dispone de datos de todo el periodo de cálculo (1988-2018), por lo que se hace necesario realizar un tratamiento y relleno de los datos.

Figura 22 Estaciones termométricas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

El primer trabajo consiste en adecuar los datos a la escala de trabajo mensual; para ello, se calcula la temperatura promedio mensual en cada estación. Posteriormente, se eliminan aquellos datos erróneos, cuyas diferencias son muy elevadas con los meses anterior y posterior, así como el respecto datos de ese mismo mes, pero otros años. Estos valores erróneos, principalmente, están asociados a los cortes de mediciones en la serie y casos donde, apenas, se tiene mediciones de unas pocas horas o días para obtener el valor medio del mes completo.

Sobre esta base se realiza el recuento de meses con dato en cada estación. La siguiente tabla muestra el número de meses con dato, coloreado en verde aquellos años completos, en amarillo los años con algunos meses incompletos y, en rojo, los años sin dato.

Tabla 11. Número de meses con dato de temperatura

AÑO	CZL	DBK	FAA	GAD	GAM	GTW	HUM	JAG	LMB	TRA	VTM
1975	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
1976	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1977	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1978	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	0	12	0	2	0	0	0	0	0	0
1980	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1981	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1982	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1983	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	9	0	12	0	0	0	0	0	0
1985	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1986	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1988	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1989	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1990	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1993	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1995	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1998	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1999	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	12	0	12	0	0	0	7	0	4
2001	0	0	12	4	12	0	0	0	12	0	12
2002	0	0	12	7	12	0	0	0	12	0	11
2003	0	0	12	11	12	0	0	0	12	0	12
2004	0	0	12	12	12	0	0	0	12	0	12
2005	0	0	12	12	12	0	0	0	12	0	12
2006	0	0	12	12	12	7	0	0	12	0	12
2007	12	0	12	12	12	12	0	9	12	4	12
2008	12	5	12	12	12	12	0	12	12	12	12
2009	12	8	12	12	12	10	0	12	12	12	12
2010	11	5	12	12	12	10	3	12	12	12	11
2011	12	3	12	12	12	11	12	12	12	12	8
2012	12	0	11	12	12	12	12	4	12	12	0
2013	12	0	12	12	12	12	12	10	12	12	0
2014	10	0	12	11	12	12	12	0	9	12	0
2015	11	11	7	8	8	12	11	11	11	0	11
2016	12	10	12	12	12	12	10	12	12	10	12
2017	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8
2018	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0
2019	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0
2020	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP

Como complemento a lo anterior, y previo al relleno los datos faltantes, se hace un análisis global de las estadísticas de las series disponibles en cada estación. Se recopilan los principales datos de cada serie y se selecciona una estación para obtener el gradiente térmico entre estaciones. La estación de referencia seleccionada es la Gamboa (GAM), por ser la estación, situada dentro de la Cuenca, que tiene el periodo de medición más amplio y mayor número de años completos.

Tomando de referencia la temperatura media anual, se calculan los gradientes térmicos respecto a la estación de referencia. El gradiente térmico indica la variación de temperatura con la altura. En condiciones normales, un orden de magnitud válido para el gradiente térmico es 0,006°C/m (6°C por cada 1000 metros de altura). A continuación, se recopila los principales datos de cada estación y el gradiente térmico obtenido:

Tabla 12. Estaciones termométricas

Código estación	Nombre estación	Altura (m)	Cuenca	Año inicial	Año final	Años completos	Tª Media	Gradiente GAM (°C/m)
CZL	Corozal Oeste	9	Fuera de la cuenca	2007	2020	11	27.05	0.032936
DBK	Dos Bocas	229	Pequení	2008	2020	4	24.96	0.006835
FAA	Balboa FAA	10	Fuera de la cuenca	1975	2020	41	26.90	0.027443
GAD	Gasparillal	346	Trinidad	2001	2020	15	24.39	0.006121
GAM	Gamboa	31	Gatún norte	1979	2020	39	26.31	-
GTW	Gatún West	33	Gatún sur	2006	2020	11	26.88	0.378088
HUM	Humedad	31	Gatún sur	2010	2020	8	26.81	0.551216
JAG	Jagua	546	Cirí grande	2007	2020	9	23.30	0.005863
LMB	Limón Bay	3	Fuera de la cuenca	2000	2020	18	26.93	0.021697
TRA	Tranquilla	64	Madden local	2007	2020	10	26.10	0.006659
VTM	Vistamares	969	Indio este	2000	2017	9	20.70	0.005981

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP

Como se aprecia en la tabla anterior, muchas de las estaciones de la Cuenca (datos rellenos en verde) tienen un gradiente con un orden de magnitud esperado del entorno de los 0.006-0.007°C/m. En el caso de las estaciones situadas fuera de la Cuenca de estudio (Corozal Oeste, Balboa FAA y Limon Bay), se aprecia que el gradiente se encuentra en el entorno de 0.02-0.03 °C/m (datos rellenos en amarillo); esto se debe probablemente a la influencia marítima, ya que se trata de estaciones situadas en zonas costeras, prácticamente al nivel del mar. Estas estaciones no serán utilizadas, por encontrarse fuera de la Cuenca y con unas condiciones costeras que no son representativas del comportamiento del resto de subcuencas. Finalmente, hay dos estaciones (GTW y HUM) que, aun estando dentro de la Cuenca, presentan valores de gradiente fuera de lo normal 0.35-0.55 °C/m (datos rellenos en rojo). Estos casos pueden deberse a que las diferencias de altura, con la estación de referencia, son muy pequeños; de cualquier manera, se trata de dos estaciones con menor número de datos con años y cuyos datos graficados presentan más ruido del esperado. Siguiendo un criterio de prudencia y al disponer de otras estaciones con datos se opta por excluir las dos estaciones para la obtención de la temperatura media mensual. Por lo tanto, las estaciones seleccionadas para su utilización serán aquellas (relleno verde) que estando dentro de la cuenca presentan valores de gradiente similares al esperado.

El relleno de datos se realiza en dos fases:

- En primer lugar, se rellenan los vacíos en la estación de referencia. Como se dispone de casi 40 años con datos, se tomará como dato la temperatura media mensual del mes a rellenar, obtenida como promedio del resto de serie con datos.

- En el resto de las estaciones seleccionadas, como ninguna de sus series es tan amplia como para emplear el criterio anterior, serán rellenas con base en la información de la estación de referencia, y aplicando el gradiente térmico calculado con anterioridad.

De este modo, se obtiene una serie de temperaturas mensuales para el periodo de 1980 (primer año completo de la estación de referencia) al año 2020. Si bien, dentro del WEAP, solo se empleará el periodo de cálculo 1988-2018, el archivo queda preparada por si, en futuros usos del modelo, se desea realizar cálculos adicionales.

La temperatura por emplear, en cada subcuenca, se obtiene a partir de la serie de la estación más representativa (considerando criterios de cercanía y altura) y aplicando un gradiente térmico de 0.006°C/m, entre la altura de la estación y la altura media de la subcuenca. En la siguiente tabla se muestran la estación empleada en cada subcuenca, así como el gradiente total respecto a esa estación:

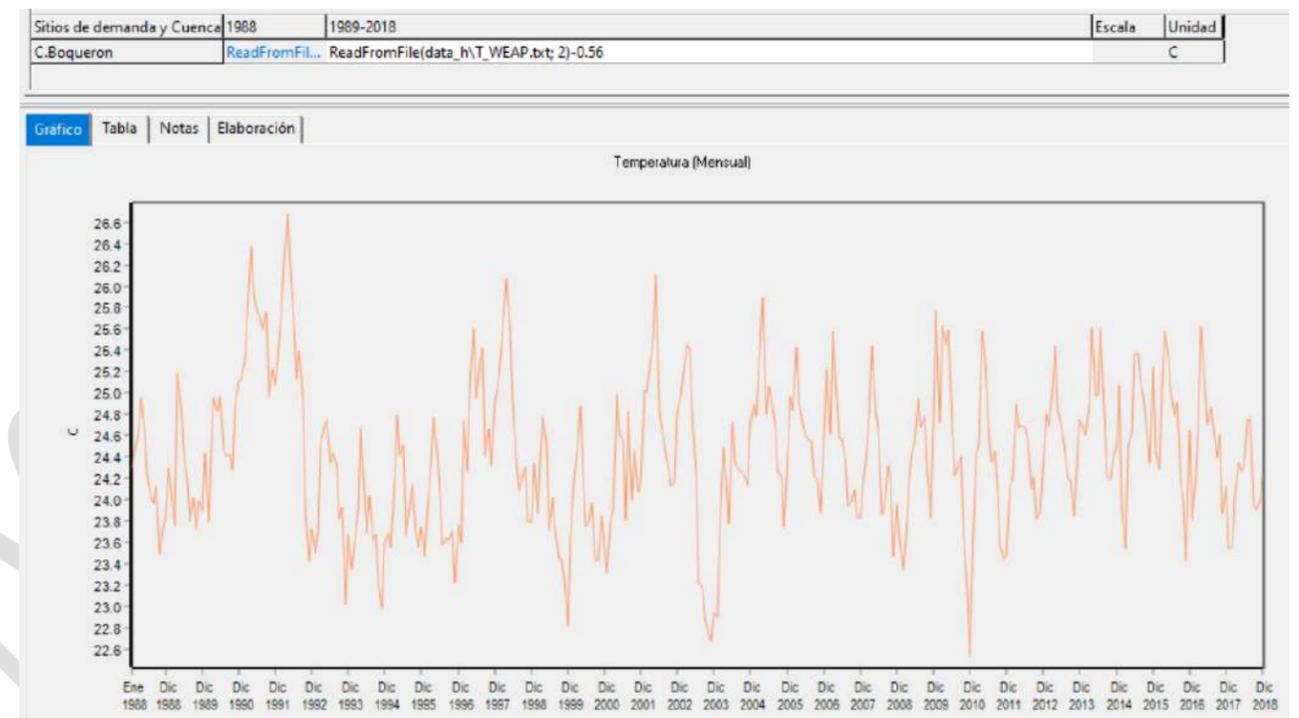
Tabla 13. Gradiente térmico por subcuenca

Subcuencas	Altura media cuenca(m)	Código estación representativa	Nombre estación representativa	Altura estación (m)	Gradiente (°C)
Boquerón	323	DBK	Dos Bocas	229	-0.56
Pequení	310	DBK	Dos Bocas	229	-0.49
Chagres	474	VTM	Vistamares	969	2.97
Indio Este	521	VTM	Vistamares	969	2.69
Madden Local	242	TRA	Tranquilla	64	-1.07
Gatún	318	DBK	Dos Bocas	229	-0.53
Gatún Norte	132	GAM	Gamboa	31	-0.61
Cirí Grande	328	GAD	Gasparillal	346	0.11
Trinidad	324	GAD	Gasparillal	346	0.13
Gatún Sur	103	GAM	Gamboa	31	-0.43

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP

Finalmente, es dentro del WEAP donde se obtiene la temperatura de cálculo, mediante la programación de la fórmula que, haciendo referencia a un archivo global con las series de temperatura por estación, aplica el gradiente global de cada subcuenca. De este modo, el programa se encarga de calcular la serie de temperaturas, mes a mes, a lo largo de todo el periodo de estudio. Este cálculo, dentro del WEAP, permitirá en un futuro emplear el mismo modelo para calcular otros periodos de simulación, o ampliar la serie a futuros registros, con tan solo actualizar el archivo global de temperaturas.

Figura 23 Serie de temperatura 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP



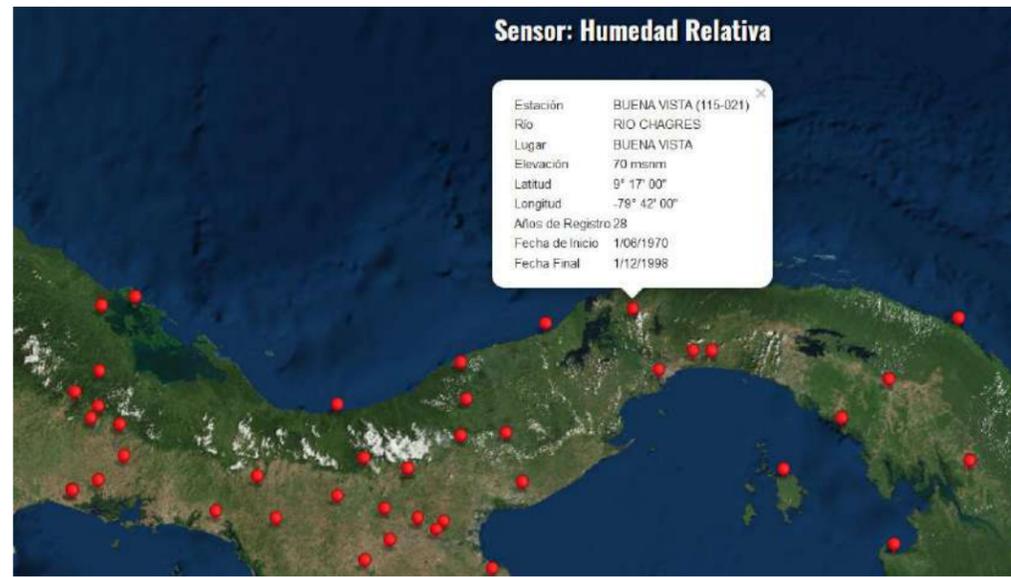
Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Humedad relativa y velocidad del viento

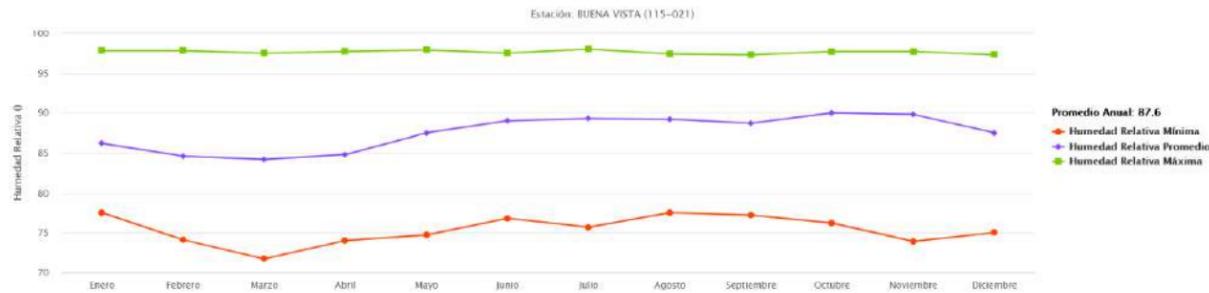
La humedad relativa y la velocidad del viento tienen una importancia menor, respecto a la temperatura y la precipitación. Estos datos son empleados por el módulo hidrológico para calcular la evapotranspiración, pero con una influencia menor al resto de variables. Es, por tanto, suficiente emplear datos de un año promedio y replicar estos valores a lo largo de todo el periodo de simulación. Para ello, como fuente de información, se emplean los datos mensuales del año promedio, disponibles en la web de ETESA, de una estación situada dentro de la Cuenca o en las inmediaciones.

Para la humedad relativa se emplean los datos de la estación de Buena Vista (código ETESA 115-021), que se encuentra dentro de la Cuenca y dispone de una serie de datos de 28 años. Las estadísticas de la estación y los valores para año promedio se muestran en las siguientes figuras.

Figura 24 Datos de humedad relativa



Histórico de Humedad Relativa



Fuente: ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>)

Tabla 14. Humedad relativa

Mes	Humedad promedio (%)
ENE	86.2
FEB	84.6
MAR	84.2
ABR	84.8
MAY	87.5
JUN	89.0
JUL	89.3
AGO	89.2
SEP	88.7
OCT	90.0
NOV	89.8
DIC	87.5

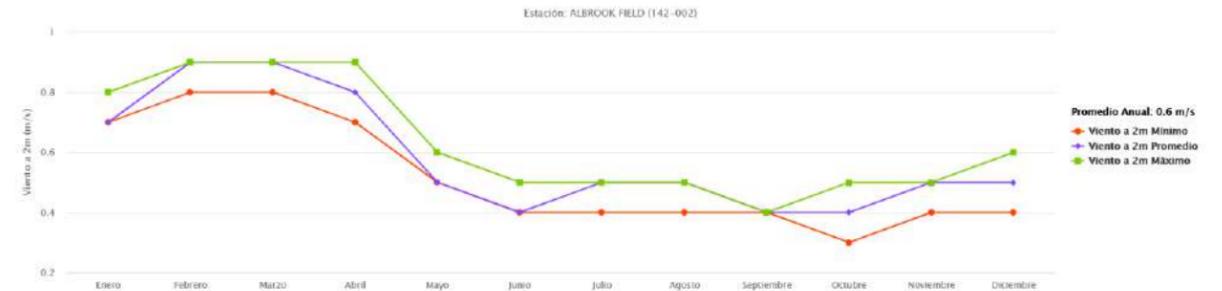
Fuente: Equipo PIOTA, 2021. Datos de ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>)

En el caso de la velocidad del viento, el dato concreto que se requiere es la velocidad del viento a 2 metros de altura. Para esta variable, la estación más cercana a la Cuenca es Albrook Field (142-002) con 66 años de registro.

Figura 25 Datos de velocidad del viento a 2 metros



Histórico de Viento a 2m



Fuente: ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>)

Tabla 15. Velocidad del viento

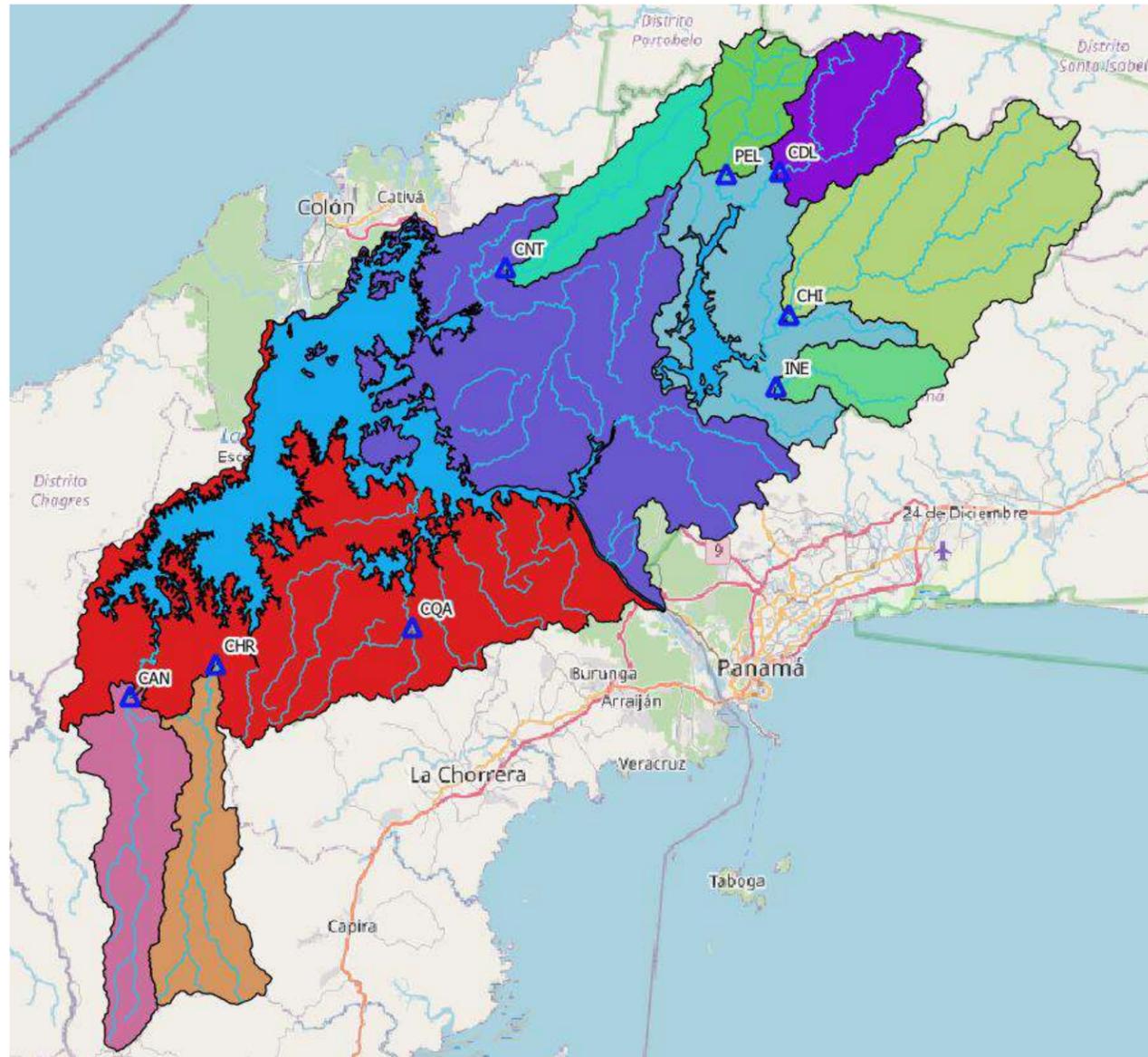
Mes	Velocidad viento a 2 metros (m/s)
ENE	0.7
FEB	0.9
MAR	0.9
ABR	0.8
MAY	0.5
JUN	0.4
JUL	0.5
AGO	0.5
SEP	0.4
OCT	0.4
NOV	0.5
DIC	0.5

Fuente: Equipo PIOTA, 2021. Datos de ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>)

3. Caudales

Por último, para la calibración del módulo hidrológico se necesitan datos de aforos en los ríos. Se dispone de registros de 8 estaciones hidrométricas, situadas sobre los principales ríos de las subcuencas. La mayor parte de las estaciones disponen de datos del periodo comprendido entre el año 1934 hasta el año 2019, por lo que la coincidencia con el periodo de simulación es completa. Tan solo la estación de Guarumal (INE), en la subcuenca Indio Este, tiene un periodo inferior al de simulación. Sus datos van del año 2008 al 2019, por lo que en este caso el periodo de comparación en el proceso de calibración se ajusta a los datos disponibles.

Figura 26 Estaciones hidrométricas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Tabla 16. Estaciones hidrométricas

Nombre estación hidrométrica	Código estación hidrométrica	Subcuenca	Año inicial	Año final	Años completos
Peluca	PEL	Boquerón	1934	2019	86
Candelaria	CDL	Pequení	1934	2019	86
Chico	CHI	Chagres	1934	2019	86
Guarumal	INE	Indio Este	2008	2019	12
Ciento	CNT	Gatún	1934	2019	86
Los Cañones	CAN	Cirí Grande	1934	2019	86
El chorro	CHR	Trinidad	1934	2019	86
Caño Quebrado	CQA	Gatún Sur	1989	2019	31

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Cabe destacar que la división de subcuencas del modelo WEAP responde a la ubicación de las estaciones hidrométricas de modo que funcionen como puntos de control. De hecho, en el cálculo hidrológico la información hidrométrica será empleada como referencia para comparar los resultados del modelo y ajustar los parámetros del suelo para minimizar las diferencias en lo que se entiende como proceso de calibración el cual se detalla más adelante.

Parámetros del suelo

Los parámetros de usos de suelo, dentro de WEAP para el método empleado son los presentados en la siguiente tabla, junto al tanque donde se aplican conforme al esquema presentado con anterioridad.

Tabla 17. Parámetros del suelo en el modelo WEAP

Tanque 1	Parámetro	Descripción
Tanque 1	Kc	Coefficiente de Cultivo
	RRF	Factor de Resistencia a la Escorrentía
	Sw	Capacidad de Agua del Suelo
	Z1	Z1 Inicial
	F	Dirección Preferencial del Flujo
	Ks	Conductividad de la Zona Radicular
Tanque 2	Parámetro	Descripción
Tanque 2	Dw	Capacidad Agua Profunda
	Z2	Z2 Inicial
	Kd	Conductividad Profunda

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Los datos iniciales se estiman a partir de la información de usos del suelo (clasificación de usos de suelo de 2020 de la CHCP que se incluyó en el capítulo de diagnóstico del PIOTA), mapas hidrogeológicos disponibles en el Atlas Ambiental de la República de Panamá 2010 y bibliografía existente (Yates et al. 2005; Escobar & Sandoval, 2014; Amato et al. 2006; Allen et al. 1998).

Estos parámetros, que se detallan a continuación, son los que deben ajustarse durante el proceso de calibración para conseguir una buena correlación entre los caudales simulados y observados, consiguiendo una mejor respuesta hidrológica de la Cuenca.

- **Conductividad de la zona radicular (Ks):** determina la capacidad de que el agua se transporte como escorrentía subsuperficial y percolación (en mm/mes). Los valores iniciales de este parámetro se estimaron para cada uso de suelo.

- **Conductividad de la zona profunda (Kd):** representa la capacidad de que el agua se transporte como flujo base (en mm/mes). Este valor es constante para todos los usos de suelo.
- **Factor de resistencia a la escorrentía (RRF):** factor adimensional que controla la escorrentía directa y le influyen directamente el grado de cobertura vegetal y la pendiente de la cuenca. Cuanto mayor sea el valor, menor escorrentía directa.
- **Dirección preferencial de flujo (f):** este parámetro determina la proporción de agua en la zona radicular (balde superior) que fluye como escorrentía subsuperficial o se infiltra al baldé inferior, variando entre 1 (flujo 100% horizontal) hasta 0 (100% vertical).
- **Coefficiente de Cultivo (Kc):** depende del tipo de cultivo (uso del suelo) y afecta directamente a la evapotranspiración. Los valores iniciales se estimaron a partir de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) según Allen et al. (1998).
- **Capacidad de agua del suelo en la zona de raíces (Sw):** es la capacidad de agua efectiva, en mm, que es capaz de almacenar la capa superior del suelo (tanque 1).
- **Capacidad de agua profunda (Dw):** la capacidad de agua efectiva, en mm, que tiene el baldé inferior. Este valor es único para cada cuenca y no varía con los distintos usos del suelo.
- **Z1 y Z2:** representan los almacenamientos de agua relativos (en %) de los tanque superior e inferior respectivamente.

La estimación inicial se apoya en la bibliografía existente, ya mencionada, para cuantificar los parámetros, en función de los usos del suelo disponibles en cada subcuenca. El análisis de estos parámetros es una etapa importante de la modelación hidrológica, sin embargo, está sujeta a la posterior calibración y ajuste para mejorar la representatividad del modelo.

Los parámetros, principalmente, dependen de los usos del suelo, por lo que dentro del esquema de funcionamiento del WEAP se hace necesario indicar, en cada subcuenca, la superficie de cada tipo de suelo, lo cual se realiza mediante herramientas de cálculo GIS.

2.1.3.2.3 Proceso de calibración del módulo hidrológico

Previo a la utilización del modelo y la realización de cálculos, es recomendable ejecutar un proceso de calibración, donde se busque minimizar diferencias entre los resultados del modelo y datos medidos en campo.

El proceso de calibración, a su vez, se divide en dos fases; una primera de calibración, donde se ajustan los parámetros; y otra de validación, donde se verifica que los parámetros ajustados son correctos. Finalmente, el proceso de calibración debe ser acorde a los periodos de simulación previstos, así como los objetivos globales buscados en el modelo.

El proceso de calibración, de cualquier modelo matemático, consiste en modificar los parámetros inicialmente estimados de manera que los valores simulados numéricamente se ajusten a los datos conocidos, con el objetivo de aumentar la representatividad del modelo respecto a la realidad medida.

En el caso de un modelo hidrológico, en el cual intervienen multitud de parámetros estimados a partir de información secundaria, al no ser viable la caracterización completa de la Cuenca a partir de mediciones directas en campo, el proceso de calibración resulta fundamental. En este caso concreto, el ajuste se realiza tomando como referencia los caudales medidos en las estaciones hidrométricas de las subcuencas aforadas.

Se puede apreciar, en las ecuaciones del balance hidrológico (detalladas anteriormente en la descripción del método hidrológico), que la relación entre los distintos términos que intervienen es no-lineal. En el proceso de calibración, se comienza detectando, mediante un análisis de sensibilidad general, los parámetros más sensibles en el modelo de estudio. El resultado de este análisis muestra que los cuatro parámetros principales son Kc, Ks, Sw y f; afectando, los

dos primeros, en mayor medida a los volúmenes y, los dos últimos, a caudales pico y base. Por tanto, son estos parámetros sobre los que, principalmente, se realizan los ajustes.

Por su parte, el proceso de validación consiste en verificar la bondad del ajuste de los parámetros calibrados, comparando los resultados del modelo con los datos registrados en un periodo de tiempo diferente al empleado en la calibración. Finalmente, y una vez validada la calibración de parámetros, se realizará la simulación del periodo total de cálculo, que refleje de manera representativa el comportamiento hidrológico de la CHCP.

El primer paso para completar el proceso completo (calibración-validación-simulación) consiste en determinar los periodos de tiempo que comprenderán cada cálculo, y que serán en función de los datos disponibles. De cara al proceso de calibración, se va a emplear como periodo completo un intervalo de 30 años (1989-2018), siendo el año inicial 1988 un año de calentamiento para minimizar la influencia de las condiciones de humedad inicial del terreno estimadas. Como periodo de calibración, se escoge el último intervalo de 10 años disponible (2009-2018), por ser el más cercano a los usos del suelo empleados; mientras que los 10 años anteriores (1999-2008) se emplearán para la validación.

Sin embargo, debe puntualizarse aquí que, en la subcuenca Indio Este, no se dispone de la serie completa anteriormente mencionada, sino solo un periodo de 11 años entre 2008 y 2018. Por ello, en este caso particular, se ha utilizado el intervalo de los últimos 5 años disponibles para la calibración (2014-2018); y los 5 anteriores para la validación (2009-2013).

Para establecer el grado de correspondencia entre los caudales simulados y observados, se debe utilizar una función objetivo sobre la que se busque el valor óptimo, durante la variación de parámetros calibrados. En este caso, se han utilizado dos índices de referencia, ampliamente reconocidos en modelos hidrológicos (Moriasi et al. 2007). Estos son el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) en comparación con la variación de datos observados, y el sesgo o desviación relativa de caudales (PBIAS), que evalúa el error en volumen de agua y penaliza de forma severa las épocas de caudales bajos. Un PBIAS positivo indica una subestimación y uno negativo indica una sobreestimación de caudales

Las ecuaciones que emplean estos indicadores son:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}}$$

Donde $Q_{s,i}$ es el caudal simulado y $Q_{o,i}$ el observado/medido para el periodo i , \bar{Q}_o es el promedio de los caudales observados en los n días totales.

El índice NSE varía entre generalmente 0 y 1, siendo 1 el ajuste perfecto. La literatura existente (Moriasi et al. 2007) indica que la calibración se puede considerar aceptable en valores superiores a 0.60 y excelente en valores superiores a 0.8. El PBIAS se mide en porcentaje (%) y se puede considerar muy bueno para valores $< \pm 10$. Lógicamente, la exigencia de estos indicadores en la validación es menor que en la calibración, por ello se considera en la literatura como aceptable un índice de Nash-Sutcliffe superior a 0.50, siendo muy buenas las validaciones por encima de 0.70.

En la tabla siguiente se recogen los criterios particulares que fueron adoptados en la calibración.

Tabla 18. Criterios de valoración de los índices NSE y PBIAS para la calibración

Valoración	PBIAS	NSE
Excelente	< ±5	0.9-1.00
Muy Bueno	< ±10	> 0.8
Bueno	< ±15	> 0.6
Insuficiente	> ±15	< 0.6

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Para cuantificar el proceso de validación, los indicadores empleados son los mismos (NSE y PBIAS). Igualmente, se comprobó el ajuste de parámetros para el periodo completo de 30 años de simulación hidrológica (1989-2018).

Para el objetivo global resulta adecuado, en este caso, la priorización del ajuste de los volúmenes (PBIAS) frente a caudales pico y base, ya que el modelo debe diagnosticar de una manera adecuada la oferta del recurso hídrico disponible para, junto con las demandas del sistema, realizar escenarios de planificación ante variaciones futuras. De esta forma, los parámetros más relevantes del proceso de calibración han sido el coeficiente de cultivo (Kc) y la conductividad en la zona de raíces (Ks). Además, se tiene en cuenta que los valores del PBIAS para el periodo completo fueran siempre inferiores a ±5, modificando los parámetros del periodo de calibración si era necesario.

Resultados de la calibración

Se obtuvo un set de parámetros, en las distintas subcuencas, para los usos del suelo empleados que permiten ajustar la respuesta de la simulación a los caudales observados. Puede apreciarse que los cuatro parámetros, sobre los que se ha actuado, se mueven en un rango, para cada uso de suelo, que dependerá de cada subcuenca particular. El resto no han sufrido variaciones respecto a su estimación inicial.

Tabla 19. Rango de parámetros del modelo WEAP después de la calibración

Usos del Suelo	Kc		Sw		F		Ks		RRF	Z1	Z2	Kd	Dw
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max					
Área Poblada	0.53	0.95	200	600	0.7	1	18	50	1				
Afloramiento Rocoso y Tierra Desnuda	0.3	0.54	240	720	0.9	1	30.6	85	3.3				
Bosque Latifoliado Mixto Maduro	0.45	0.81	700	2100	0.6	0.96	54	150	9				
Bosque Latifoliado Mixto Secundario	0.6	1.08	350	1050	0.3	0.48	54	150	6.5				
Bosque Plantado de Conífera	0.75	1.25	300	900	0.3	0.48	54	150	5.5				
Bosque Plantado de Latifoliadas	0.6	1.08	350	1050	0.3	0.48	54	150	6.5				
Café	0.71	1.25	600	1800	0.6	0.96	18	50	6				
Maíz	0.9	1.25	620	1860	0.7	1	18	50	6	30	40	100	1000
Pasto	0.64	1.15	180	540	0.65	1	54	150	2				
Piña	0.23	0.41	400	1200	0.6	0.96	13.5	37.5	4.5				
Explotación Minera	0.75	1.25	250	750	0.8	1	31.5	87.5	2.5				
Rastrojo y Vegetación Arbustiva	0.26	0.47	1000	2100	0.5	0.8	36	100	3.5				
Vegetación Baja Inundable	0.9	1.25	700	2100	0.4	0.64	63	175	4				
Vegetación Herbácea	0.75	1.25	1000	2100	0.6	0.96	37.8	105	3.5				

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

El comportamiento del modelo hidrológico para las 7 subcuencas aforadas ha sido siempre excelente o muy bueno, según los criterios de valoración adoptados; y buenos o muy buenos, en la validación. Además, en el periodo completo, la valoración es también buena o muy buena, quedando el PBIAS siempre por debajo del 1%, lo que se traduce en errores de volumen muy pequeños, idóneos para el trabajo posterior. Se resumen todos los indicadores obtenidos en la siguiente tabla:

Tabla 20. Resumen de los indicadores después del proceso de calibración y validación del modelo

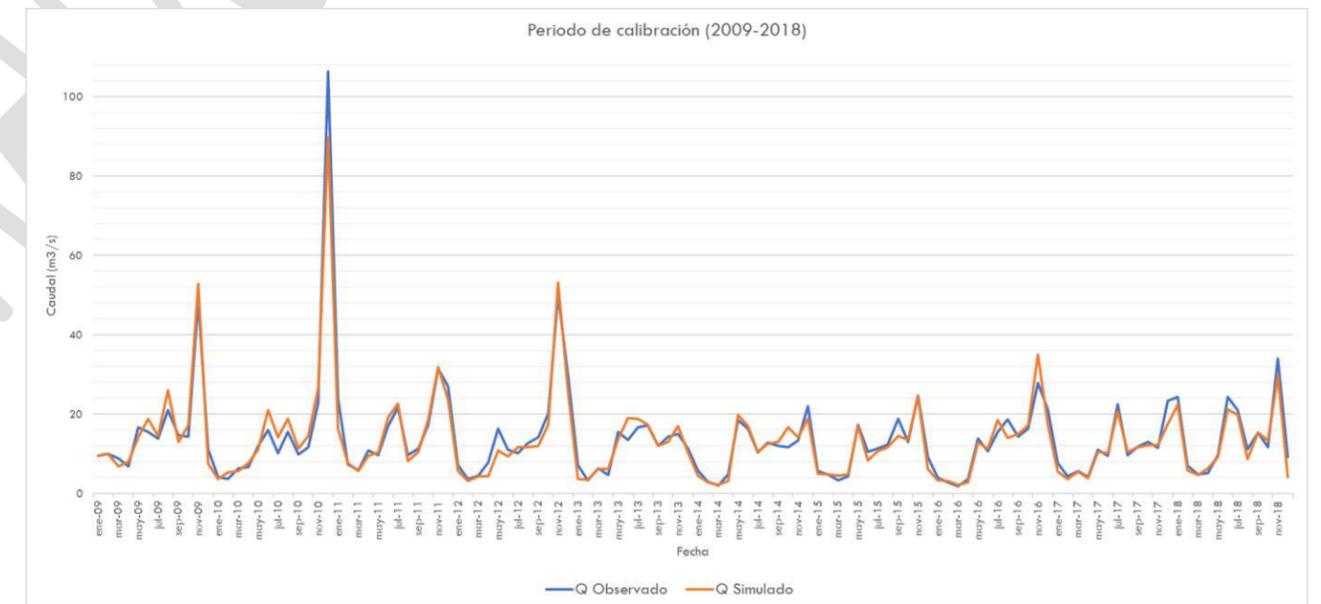
Periodo	Indicadores	Boqueron	Pequeni	Chagres	Indio Este*	Gatun	Ciri Grande	Trinidad
Calibración (2009-2018)	NSE	0.924	0.942	0.924	0.819	0.956	0.934	0.868
	PBIAS	4.588	2.725	5.644	1.473	6.588	3.298	4.972
Validación (1999-2008)	NSE	0.912	0.877	0.740	0.687	0.818	0.890	0.834
	PBIAS	-5.522	-3.588	-0.596	4.286	-7.118	4.201	3.946
Completo (1989-2018)	NSE	0.897	0.763	0.639	0.673	0.886	0.788	0.642
	PBIAS	0.047	-0.087	-0.307	0.453	0.133	0.164	0.000

* En Indio Este no se dispone de los datos totales (1989-2018). Los periodos usados son: completo 2008-2018 (11 años), calibración 2014-2018 (5 años) y validación 2009-2013 (5 años)

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

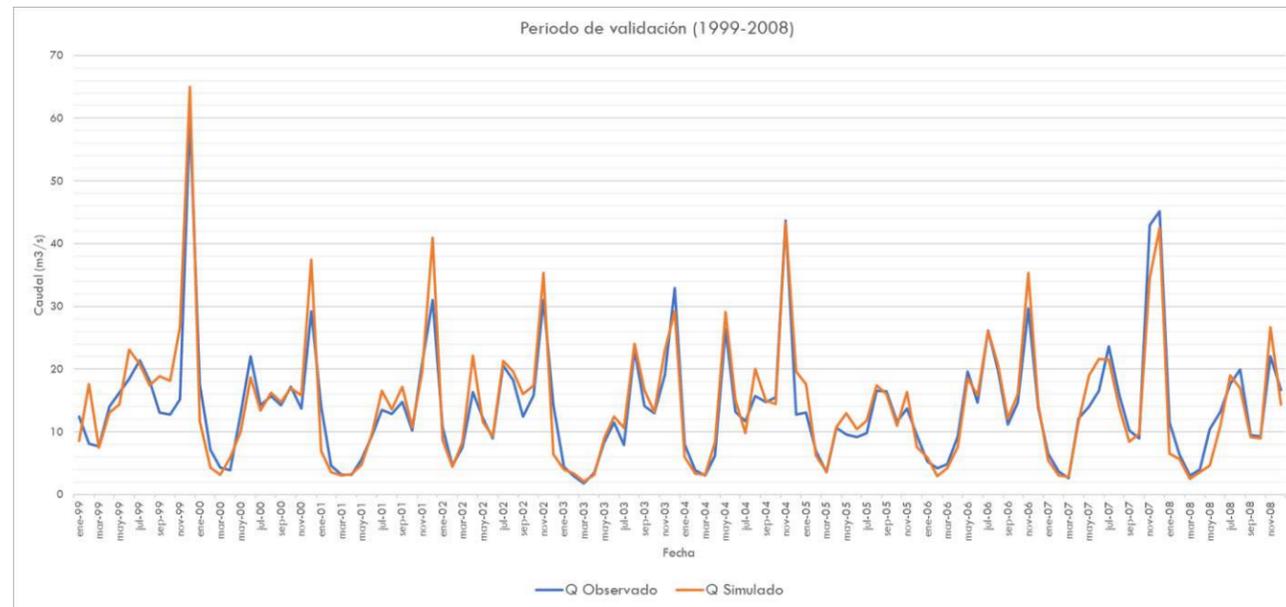
A modo de ejemplo del procedimiento empleado, se recogen en las siguientes figuras la respuesta hidrológica del modelo con los caudales simulados frente a los observados para la subcuenca del río Pequeni. La primera figura ilustra el periodo de calibración (2009-2018), una vez ajustados los parámetros, y, la siguiente, muestra el intervalo de validación (1999-2008). Como se puede comprobar, tanto con las gráficas como con los indicadores objetivo, mostrados en la tabla anterior, el ajuste final consigue reproducir de manera bastante precisa el comportamiento real de la Cuenca.

Figura 27 Caudales observados y simulados en el río Pequeni para el periodo de calibración (2009-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

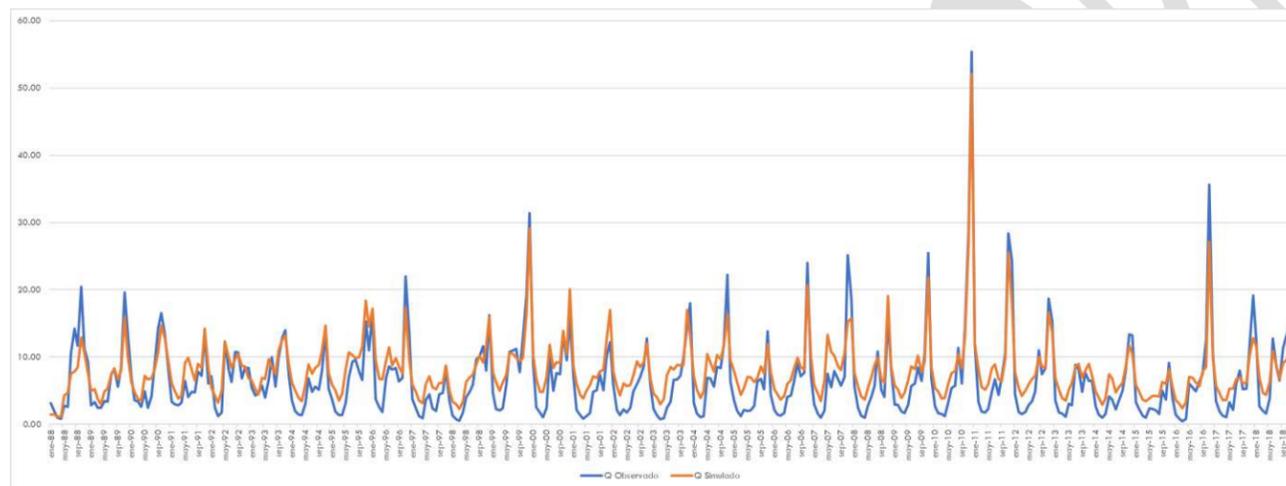
Figura 28 Caudales observados y simulados en el río Pequeñí para el periodo de validación (1999-2008)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

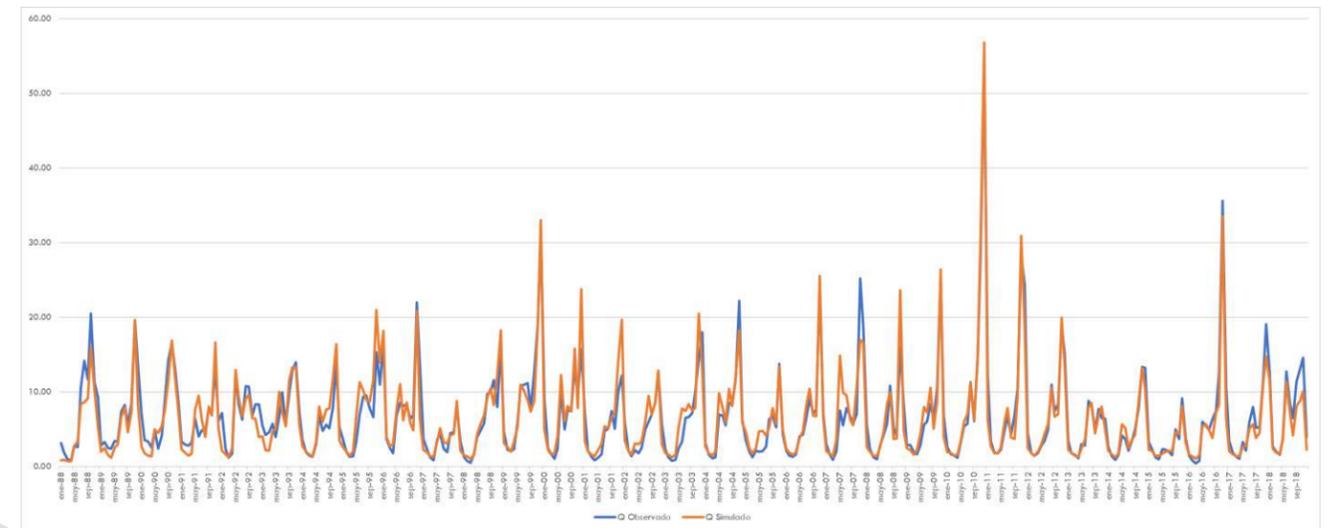
En las dos figuras siguientes se ilustra este análisis en el caso de la subcuenca Gatún; primero, mostrando la fase previa simulada antes de la calibración (parámetros inicialmente estimados); y, posteriormente, con los parámetros ya ajustados. En este caso, el promedio de caudales medidos en el periodo completo es de 6.56 m³/s, frente a los 6.55 m³/s simulados tras la calibración. Gráficamente se aprecia claramente la mejora de los resultados tras el proceso de ajuste de parámetros.

Figura 29 Caudales observados y simulados en el río Gatún con la estimación inicial (1989-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 30 Caudales observados y simulados en el río Gatún después de la calibración (1989-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

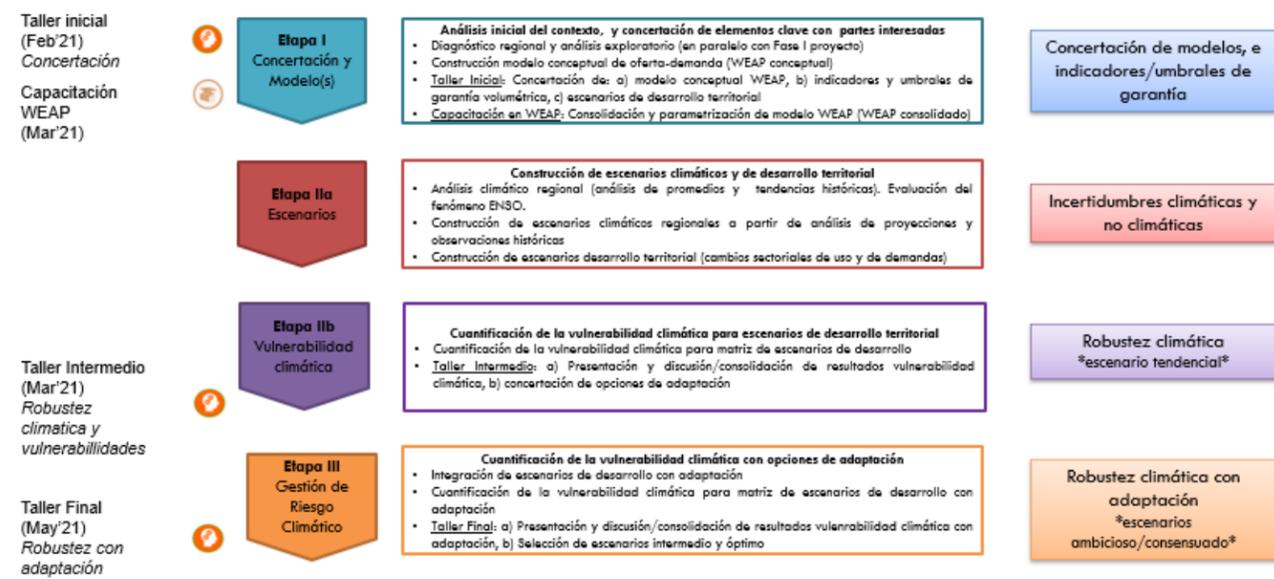
2.1.3.2.4 Conclusiones del cálculo hidrológico

El modelo hidrológico final permite obtener una serie de caudales simulados, en cada punto de control requerido, logrando el objetivo de cuantificar el recurso hídrico disponible. El análisis conjunto de los resultados del modelo y del estudio de demandas, permitirá evaluar los escenarios de desarrollo futuros para, finalmente, identificar las estrategias que contribuyan a reducir la vulnerabilidad del sistema. El análisis realizado de los datos, tras la calibración, muestra un comportamiento muy representativo en todas las subcuencas, lo que aumenta la confiabilidad del modelo global para su utilización en los diferentes análisis.

2.1.4 Proceso participativo

La participación de expertos y agentes locales es clave para avanzar de manera sólida a lo largo de las diferentes etapas del proceso RDM (Figura 31). A continuación, se realiza un resumen de las actividades realizadas en el proceso participativo (también se pueden consultar aportes directos en lo indicado la sección 2.4.3 del presente documento).

Figura 31. Etapas del proceso RDM y talleres de participación y capacitación realizados durante la Fase de Prospectiva.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

A continuación, se detallan el alcance y objetivos de las actividades organizadas para fomentar la participación de los expertos y agente locales.

- Taller Inicial.** Celebrado el 11 febrero de 2021, fue un taller de carácter técnico dirigido a expertos y personal técnico con experiencia en modelización, gestión y planificación de recursos hídricos en el área de estudio. Se registraron un total de 34 personas incluidas personal de la ACP (12), Ministerio de Ambiente (8), Universidad Tecnológica de Panamá (4), Cathalac (2), BID (1), y del equipo consultor (7). Los objetivos del taller fueron:

 - Presentación de la metodología RDM
 - Presentación del modelo WEAP-CHCP (avance de la estructura topológica y parametrización inicial)
 - Concertación de indicadores de desempeño, y de criterios y umbrales de garantía, y exploración de factores clave para la modelización de escenarios de desarrollo territorial. Para este último ejercicio se realizó una encuesta.
- Taller Intermedio.** Celebrado el 8 de marzo de 2021, fue un taller de presentación de resultados abierto a una comunidad amplia de actores y agentes locales. Se registraron un total de 76 personas incluidas personal perteneciente a la ACP, universidades, municipios del ámbito de estudio, Red de Jóvenes, diferentes ministerios nacionales, representantes de comités locales, etc. Los objetivos del taller fueron:

 - Construcción y calibración del modelo WEAP-CHCP y control de resultados para condición de línea de base (1989-2018)
 - Caracterización del clima histórico y regionalización de escenarios de cambio climático
 - Presentación de escenario de desarrollo tendencial y resultados de robustez climática

- Conclusiones y siguientes pasos

- Taller Final:** Por celebrar. El objetivo del último taller será la a) Presentación y discusión/consolidación de resultados de robustez climática para escenarios ambicioso y concertado sin y con medidas de adaptación, b) definición de las rutas de adaptación plausibles

Adicionalmente a los talleres públicos, se organizó un curso de capacitación guiado en el uso de la herramienta WEAP en el marco del proyecto PIOTA. Este curso de capacitación estuvo dirigido a personal técnico de la ACP y del Ministerio de Ambiente. El material en formato de presentaciones y ejercicios prácticos fue ajustado a las necesidades específicas de la ACP. El curso se celebró entre el 10-17 de marzo en tres sesiones diarias de 4 horas de duración cada una. Los objetivos del curso de capacitación fueron:

- Ofrecer una **capacitación guiada** sobre el uso del modelo WEAP incluyendo:

 - Funcionalidades básicas y avanzadas.
 - Destrezas específicas** de especial interés para la planificación de la cuenca y el desarrollo del PIOTA.
- Trabajar directamente sobre el modelo WEAP-CHCP para consolidar la estructura del modelo y su parametrización.

 - El modelo WEAP-CHCP es la herramienta de modelización que sirve de base para medir la robustez climática de la cuenca frente a diferentes escenarios de desarrollo territorial y de cambio climático.
 - Fomenta la **participación** directa de los técnicos especialistas en la construcción y obtención los resultados de la fase II del proyecto

2.1.5 Identificación e inclusión de indicadores de desempeño y umbrales

WEAP permite cuantificar diferentes indicadores, que informan sobre el desempeño y capacidad de un sistema de recursos hídricos para satisfacer las demandas hídricas de los principales usos de una cuenca. Durante el Taller inicial, desarrollado el 11 de febrero de 2021, se sondeó entre los participantes la idoneidad de tres indicadores de desempeño (cobertura mensual, cobertura anual y confiabilidad) para los efectos de la planificación territorial de la Cuenca.

- Cobertura mensual. Porcentaje del requerimiento mensual de suministro de un nodo, o conjunto de nodos, que es cubierto con los recursos disponibles en el mes bajo análisis.
- Cobertura anual. Porcentaje del requerimiento anual de suministro de un nodo, o conjunto de nodos, que es cubierto con los recursos disponibles en el sistema.
- Confiabilidad. Porcentaje de pasos de tiempo (mensual) del total habidos en el periodo de simulación en los que se cubre el 100% del requerimiento de suministro de un nodo de demanda.

Los resultados de la encuesta están siendo revisados y analizados y serán presentados en la versión final del presente documento.

2.2 Clima histórico y proyecciones

La metodología RDM requiere el uso de un conjunto de datos climáticos históricos de referencia y de proyecciones de cambio climático, suficientemente exhaustivo y amplio, con el fin de poder acotar toda la incertidumbre climática y, de esta forma, calcular la robustez de los diferentes escenarios planteados. Por ejemplo: no es recomendable utilizar las salidas de unos pocos modelos climáticos y, si lo es, en cambio, utilizar salidas de múltiples modelos obtenidos de un ensamble. Solo así, se puede acotar la incertidumbre y calcular la robustez, en base a la caracterización del rango plausible de cambios de temperatura y precipitación proyectadas para diferentes Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) y en referencia a las tendencias históricas.

Así, el objetivo de este capítulo es:

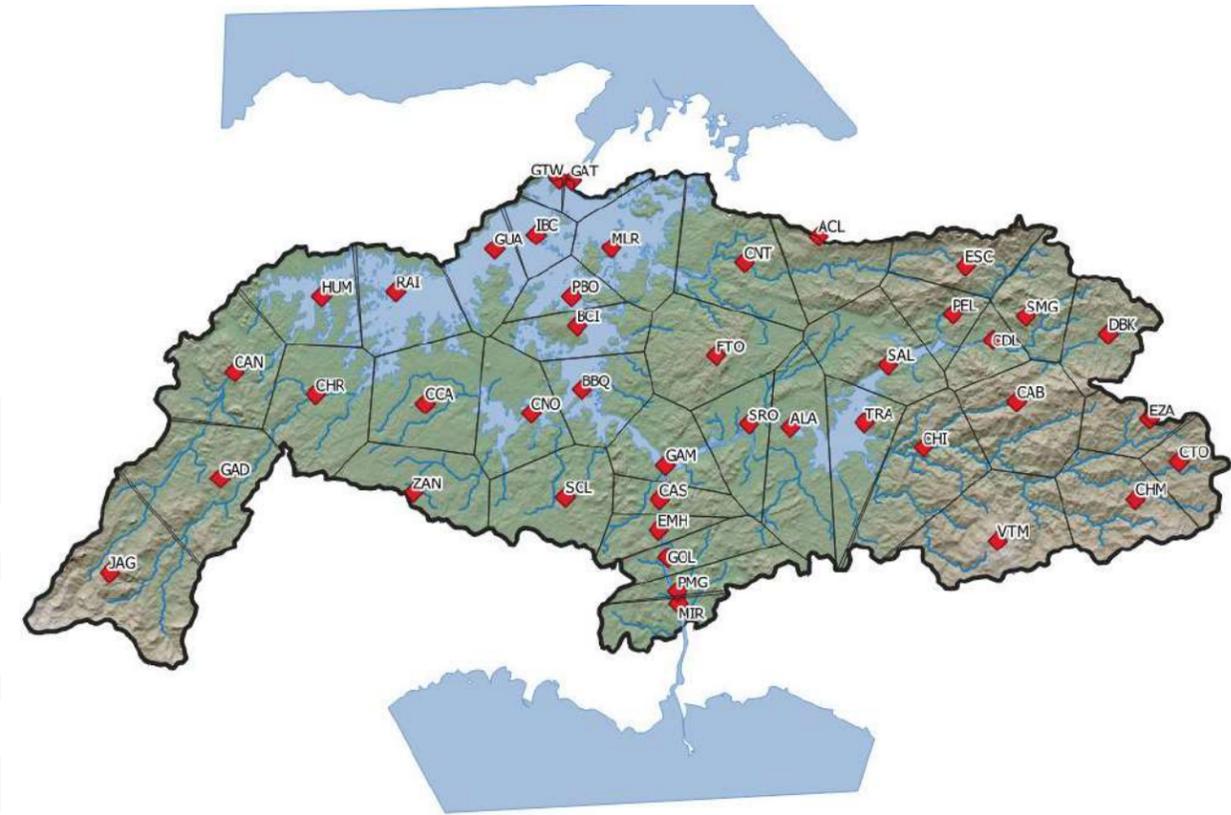
1. Consolidar un conjunto de observaciones de datos de precipitación y temperatura para un periodo de referencia histórico en la región de estudio, la CHCP, y analizar el comportamiento estacional e interanual de la precipitación y temperatura
2. Procesar para la Cuenca las proyecciones climáticas de un ensamble de modelos climáticos. Validar y regionalizar estas proyecciones para la zona de estudio.
3. Caracterizar las proyecciones climáticas y el rango plausible de cambios.

2.2.1 Tendencias en el periodo histórico

En la descripción de la construcción del modelo hidrológico (apartado 2.1.3.2) ya se explicó que, para la caracterización histórica del clima de la Cuenca, se ha partido de la base de datos de precipitación mensual acumulada (45 estaciones) y temperatura mensual promedio (11 estaciones) facilitada por la ACP.

Las series de precipitación mensual están rellenas y homogeneizadas para el periodo 1972-2018. Existen datos de temperatura desde 1975 pero únicamente para la estación GAM, localizada en el centro de la Cuenca, que ha sido finalmente la utilizada para el análisis histórico. La caracterización del clima histórico se ha centrado en el periodo 1979-2005, coincidente con el periodo para el que se disponen de precipitación proyectados por los diferentes modelos climáticos del ensamble NEX-GDDP. La Figura 32 muestra la distribución de estaciones pluviométricas usadas para la caracterización histórica del clima.

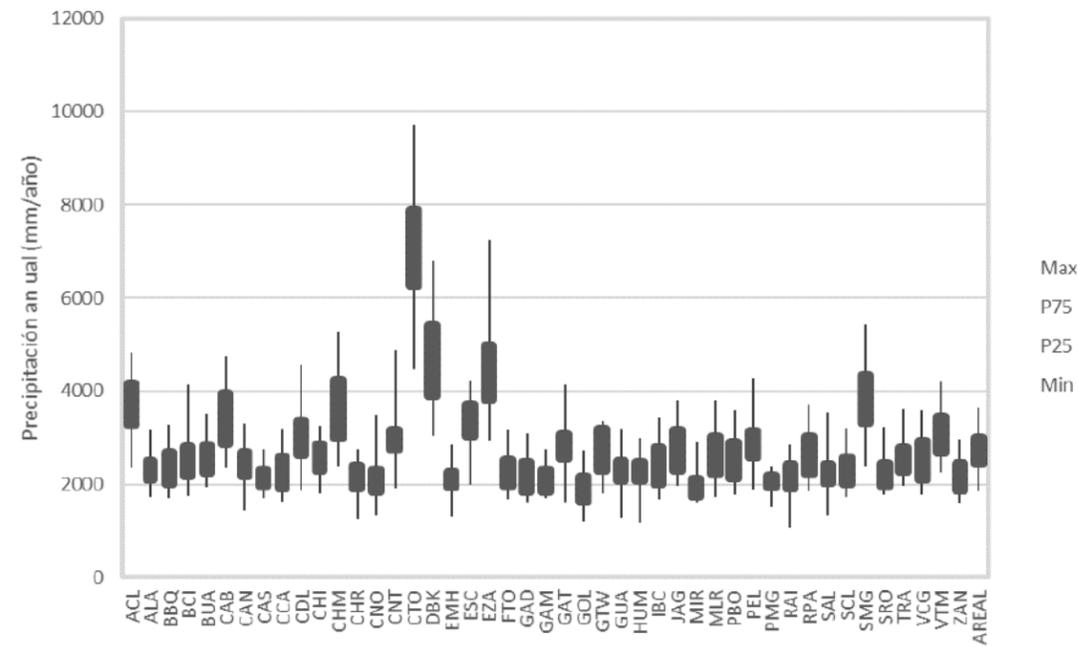
Figura 32. Distribución de estaciones pluviométricas usadas para la caracterización histórica del clima



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

La Tabla 9 muestra las medias anuales de precipitación para cada estación. Se puede apreciar que existen grandes diferencias en la pluviometría en la zona, variando la media anual entre 1.940 mm y 8.106 mm según la estación. La precipitación media anual de todas las estaciones es 2.919 mm. Por su parte, los coeficientes de variación están en el rango entre 0.12 y 0.25, siendo 0.19 el valor medio. Los rangos de dispersión de la precipitación anual en las estaciones también se pueden apreciar en la siguiente figura.

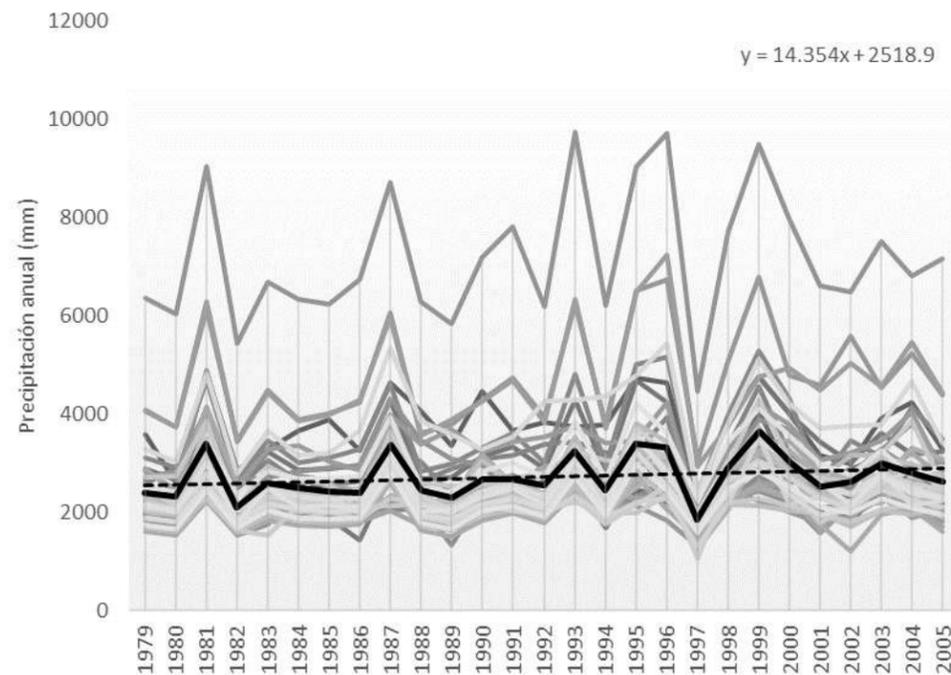
Figura 33. Rangos de dispersión de la precipitación anual en las estaciones de la cuenca (periodo 1979-2005)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

La Figura 34 muestra las sumas anuales de precipitación sobre el periodo analizado (1979-2005). Se puede ver una ligera tendencia positiva en las sumas que es de 14 mm/año (o 144 mm por diez años).

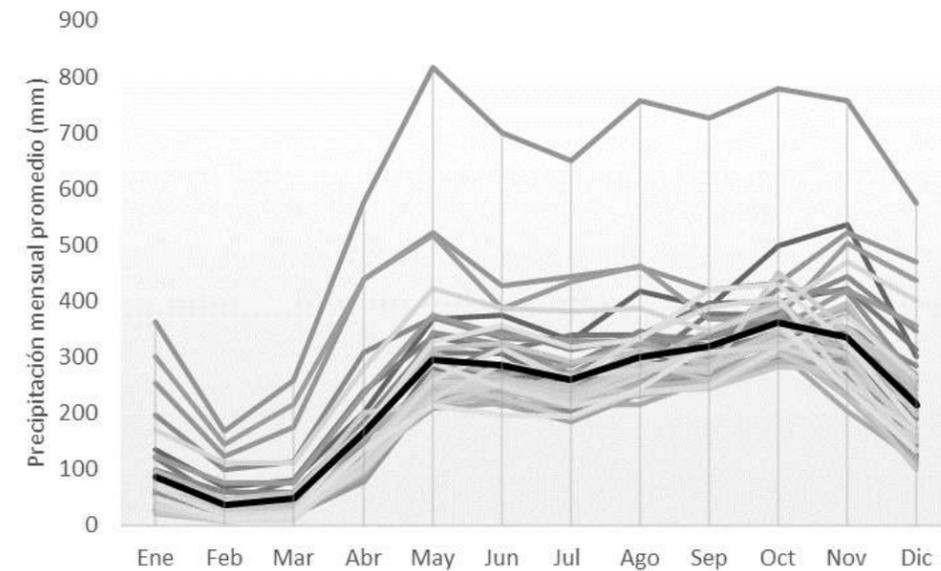
Figura 34. Evolución histórica de la precipitación anual en la cuenca (periodo 1979-2005).



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

En la Figura 35 se muestran los datos de precipitación mensual promedio para cada estación. Se ve que todas las estaciones siguen el mismo patrón estacional (mínimos en febrero y marzo, y época lluviosa entre mayo y noviembre).

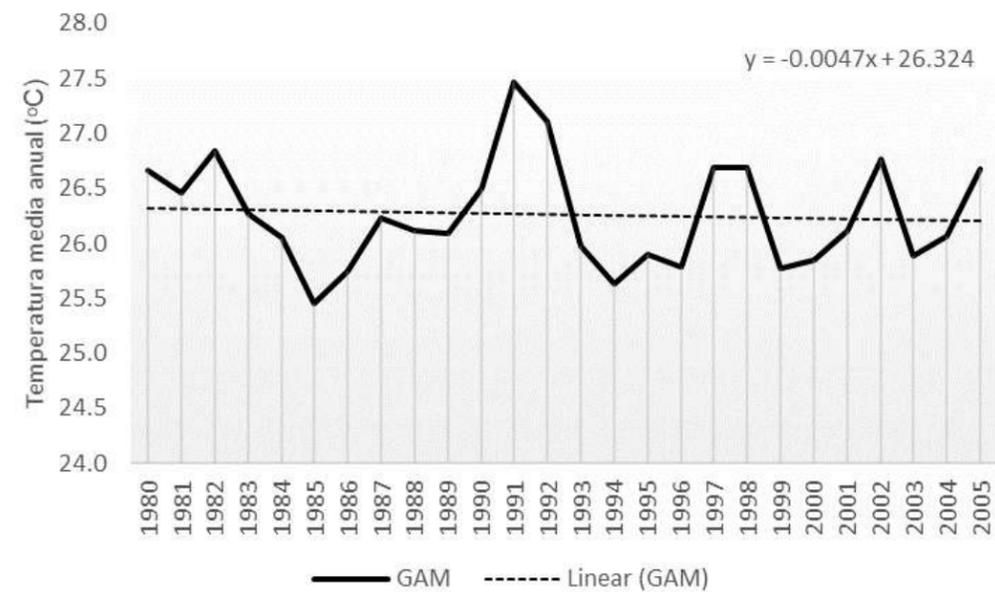
Figura 35. Precipitación mensual promedio en la cuenca (periodo 1979-2005)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Para la temperatura, una única estación estaba disponible con información completa para todo el periodo de referencia histórico (1979-2005). En esta estación no se registró una tendencia significativa de cambio de temperatura (la tendencia negativa mostrada en la Figura 36 no es significativa).

Figura 36. Evolución histórica de la temperatura media anual y tendencia interanual en la estación GAM



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.2.2 Regionalización de proyecciones

Los escenarios de clima futuro se obtuvieron a partir de las proyecciones facilitados por la iniciativa NEX-GDDP de la NASA. NEX-GDDP es un producto consolidado, que incluye proyecciones estadísticamente regionalizadas de datos diarios de temperatura (máxima y mínima) y de precipitación para los 21 modelos climáticos del proyecto CMIP5; y para las trayectorias de emisión de gases RCPs 4.5 y RCP 8.5 (véase la Tabla 21 para un listado de los modelos y su origen).

La técnica estadística de regionalización (o escalado regional) empleada para generar NEX-GDDP se basa en el método de corrección del sesgo por desagregación espacial (BCSD, en sus siglas en inglés) que, a su vez, usa datos combinados de reanálisis y observaciones históricas para la corrección (producto GMFD de la Universidad de Princeton). Los datos están disponibles a una resolución espacial alta de 0.25 grados (~ 25 km x 25 km) para el período comprendido entre 1950 y 2100 (Tabla 21). Las particularidades del conjunto de datos NEX-GDDP proporcionan los datos necesarios para acotar y caracterizar las incertidumbres climáticas de la región de estudio, permitiendo generar escenarios, de precipitación y temperatura, más robustos y adecuados a los objetivos generales.

Tabla 21. Modelos climáticos incluido en el ensamble NASA-NEX y sus características

Modelo	Centro de investigación	País	Resolución (Original)		Resolución (NASA-NEX)	
			Lat (°)	Lon (°)	Lat (°)	Lon (°)
BCC-CSM1-1	GCESS	China	2.79	2.81	0.25	0.25
BNU-ESM	NSF-DOE-NCAR	China	2.79	2.81	0.25	0.25
CanESM2	LASG-CESS	Canada	2.79	2.81	0.25	0.25
CCSM4	NSF-DOE-NCAR	USA	0.94	1.25	0.25	0.25
CESM1-BGC	NSF-DOE-NCAR	USA	0.94	1.25	0.25	0.25
CNRM-CM5	CSIRO-QCCCE	France	1.40	1.41	0.25	0.25
CSIRO-MK3-6-0	CCCma	Australia	1.87	1.88	0.25	0.25
GFDL-CM3	NOAAGFDL	USA	2.00	2.50	0.25	0.25
GFDL-ESM2G	NOAAGFDL	USA	2.02	2.00	0.25	0.25
GFDL-ESM2M	NOAAGFDL	USA	2.02	2.50	0.25	0.25
INMCM4	IPSL	Russia	1.50	2.00	0.25	0.25
IPSL-CM5A-LR	IPSL	France	1.89	3.75	0.25	0.25
IPSL-CM5A-MR	MIROC	France	1.27	2.50	0.25	0.25
MIROC5	MPI-M	Japan	1.40	1.41	0.25	0.25
MIROC-ESM	MIROC	Japan	2.79	2.81	0.25	0.25
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	Japan	2.79	2.81	0.25	0.25
MPI-ESM-LR	MPI-M	Germany	1.87	1.88	0.25	0.25
MPI-ESM-MR	MRI	Germany	1.87	1.88	0.25	0.25
MRI-CGCM3	NICAM	Japan	1.12	1.13	0.25	0.25
NorESM1-M	NorESM1-M	Norway	1.89	2.50	0.25	0.25

Fuente: iniciativa NEX-GDDP de la NASA

Como fue mencionado anteriormente, el ensamble de NASA-NEX incluye las trayectorias de emisión de gases RCPs 4.5 y RCP 8.5. RCP 4.5 representa un "escenario de estabilización" en el que las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzan su punto máximo alrededor de 2040 y, luego, se reducen. El RCP 8.5, en cambio, representa un escenario más pesimista, en el que las emisiones no disminuyan a lo largo del siglo. Estos escenarios se seleccionan, generalmente, para analizar riesgo climático, ya que representan una buena envolvente de cambios probables en el clima y, por lo tanto, cubren una amplia gama de posibles cambios futuros en la temperatura y las precipitaciones.

Típicamente, se utilizan periodos de 30 años para analizar los cambios climáticos medios, considerando las variaciones interanuales en la temperatura y las precipitaciones. Junto con los dos escenarios RCP, anteriormente

citados, las proyecciones se evalúan en los siguientes horizontes temporales, con el año central indicado (1990, 2030 y 2060):

- Período de referencia [1990]: 1979 – 2005
- Futuro cercano [2030]: 2015 – 2045
- Futuro lejano [2060]: 2045 – 2075

La Tabla 22 muestra un resumen de los escenarios, horizontes y modelos utilizados para este estudio. En total se han utilizado y analizado salidas climáticas de 105 (5 * 21) combinaciones de escenario-horizonte.

Tabla 22. Modelos climáticos incluido en el ensamble NASA-NEX y sus características

RCP escenarios	Horizontes temporales	N° de modelos climáticos
Histórico	1990 (1979-2005)	21
RCP45	2030 (2015-2045)	21
	2060 (2045-2075)	21
RCP85	2030 (2015-2045)	21
	2060 (2045-2075)	21

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Tras la extracción de los datos para la Cuenca, los siguientes pasos, para procesar y regionalizar las proyecciones de NASA-NEX, se pueden dividir en tres:

1. Comprobación de la coherencia del producto regionalizado con salidas de estudios previos y proyecciones utilizadas en la zona
2. Ponderación de las proyecciones climáticas, según el nivel de ajuste con periodo de observación histórica
3. Regionalización a nivel local, mediante la perturbación de las series temporales de precipitación y temperatura de cada subcuenca

Estos tres pasos serán detallados a continuación.

2.2.2.1 Comprobación de la regionalización estadística NASA-NEX 25 km

Existen diferentes trabajos previos en Panamá sobre el cambio climático. Lo más relevantes son:

- La tercera comunicación nacional sobre cambio climático del Ministerio de Ambiente, producido según los acuerdos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- "Escenarios regionalizados para Centroamérica" del programa EUROCLIMA+ y proyecciones regionalizadas basadas en métodos dinámicos procedentes de la iniciativa CORDEX

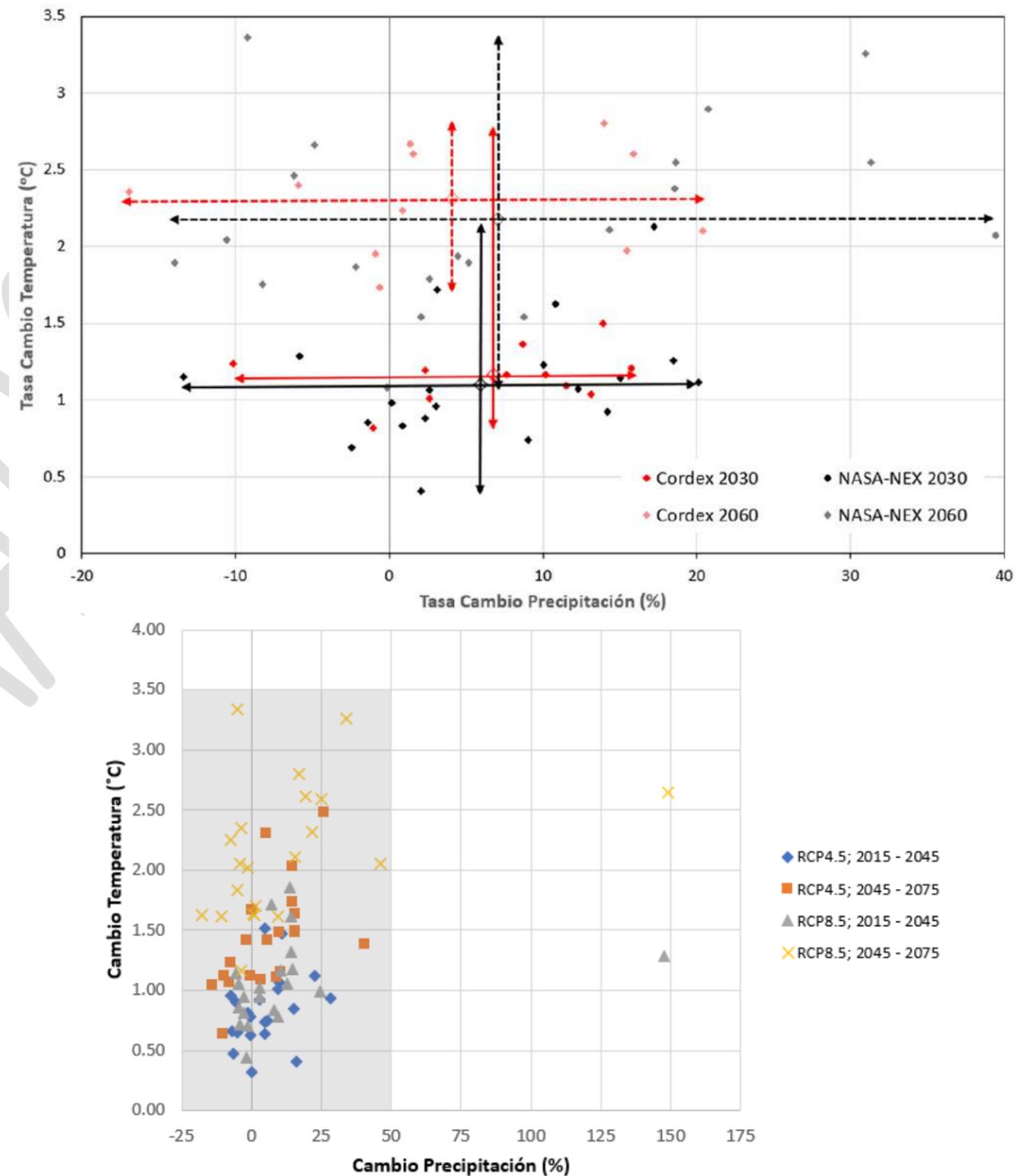
Para la 3ª comunicación nacional, se utilizaron, en total, salidas de 7 modelos climáticos para las trayectorias de emisión de gases RCPs 4.5 y RCP 8.5. Para el método RDM, es necesario poder contar con una gama más amplia de escenarios climáticos. Aun así, es conveniente que los modelos utilizados sean mayormente coherentes con los que se utilizaron anteriormente. Tras esta comprobación, se ha concluido que NASA-NEX incluye la mayoría (5 de los 7) modelos climáticos que utilizó el Ministerio de Ambiente anteriormente.

En la aplicación de la metodología RDM, es clave conocer bien el rango plausible de cambios en temperatura y precipitación. Al tener un ensamble de 21 modelos y dos RCPs, se debe poder acotar ese rango de incertidumbre bien. Aun así, conviene comprobar que el rango de los cambios proyectados, en los estudios anteriores, sea coherente con los rangos que resultan del ensamble NASA-NEX.

Para esta comparación y validación, se descargaron y analizaron datos de CORDEX para los mismo horizontes y trayectorias de emisión de gases RCP. Se analizaron los cambios medios de precipitación y temperatura sobre el periodo histórico. En la Figura 37 cada punto representa un modelo climático para un cierto horizonte (2030 o 2060) y fuente (Cordex or NASA-NEX). En el eje x se representa la tasa de cambio de precipitación (%) y en el eje y la tasa de cambio de temperatura (°C). En color rojo, se representan las proyecciones provenientes de CORDEX y, en color negro, los de NASA-NEX. Para facilitar su interpretación, las flechas indican el rango (entre mínimo y máximo) de las combinaciones horizonte-ensamble. Como se puede apreciar, las flechas rojas están mayormente envuelto dentro de las flechas negras, lo cual indica que los cambios proyectados por CORDEX (regionalización dinámica) están dentro del rango de los cambios proyectados por el ensamble de NASA-NEX.

En otras palabras, utilizando NASA-NEX podemos tener la seguridad de contar con la incertidumbre climática que proyecta también CORDEX. Por este motivo, se concluye que NASA-NEX es coherente con las salidas de las proyecciones obtenidos mediante regionalización dinámica en el proyecto "Escenarios regionalizados para Centroamérica" del programa EUROCLIMA+ y proyecciones regionalizadas basadas en métodos dinámicos procedentes de la iniciativa CORDEX.

Figura 37. Rangos de variación de precipitación y temperatura anual promedio predichos por los modelos de los ensambles CORDEX (regionalización dinámica) y NASA-NEX (regionalización estadística) para los horizontes climáticos 2015-2045 (centrado en 2030) y 2045-2075 (centrado en 2060)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.2.2.2 Ponderación según ajuste con el clima histórico

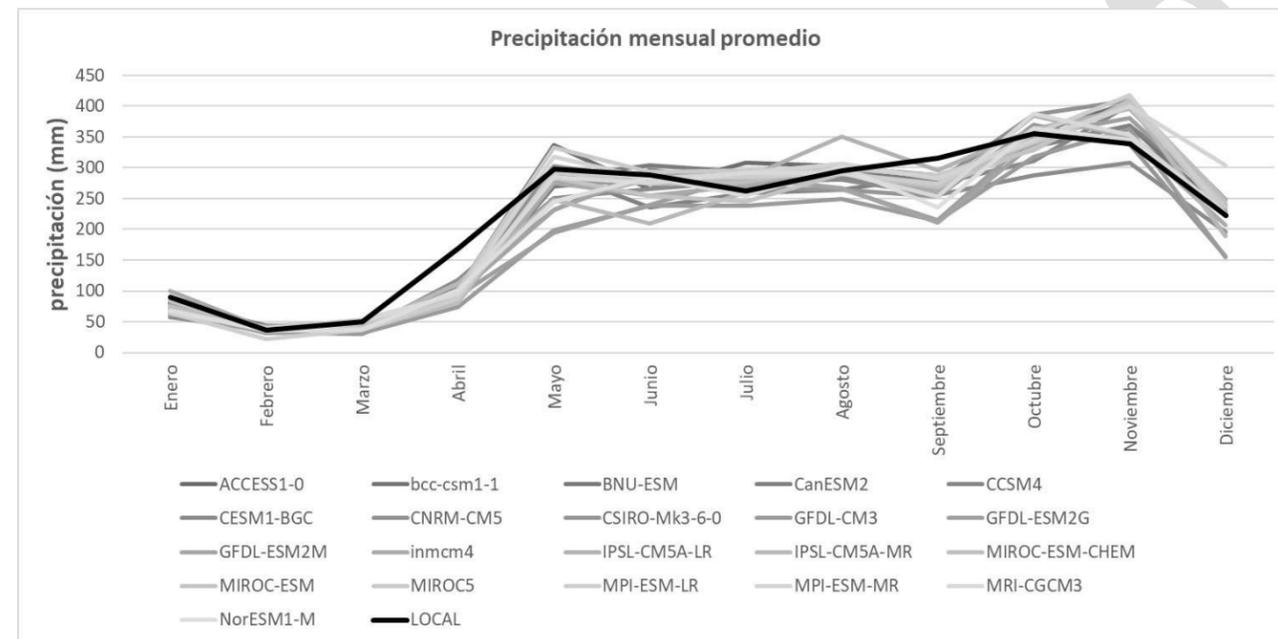
El segundo paso es la asignación de diferentes pesos a cada una de las proyecciones climáticas, en base a la coherencia de los patrones de clima extraídas con observaciones históricas y los derivados de las ejecuciones retrospectivas del producto NEX-GDDP. Estos pesos permiten estimar, en posteriores subfases del trabajo, el índice ponderado de robustez del sistema a partir de las Superficies de Respuesta al Clima.

Esta ponderación se realizó analizando el contraste y ajuste entre clima histórico observado y las proyecciones históricas de los modelos climáticos, en base a tres criterios:

- Estacionalidad
- Tendencia interanual
- Extremos

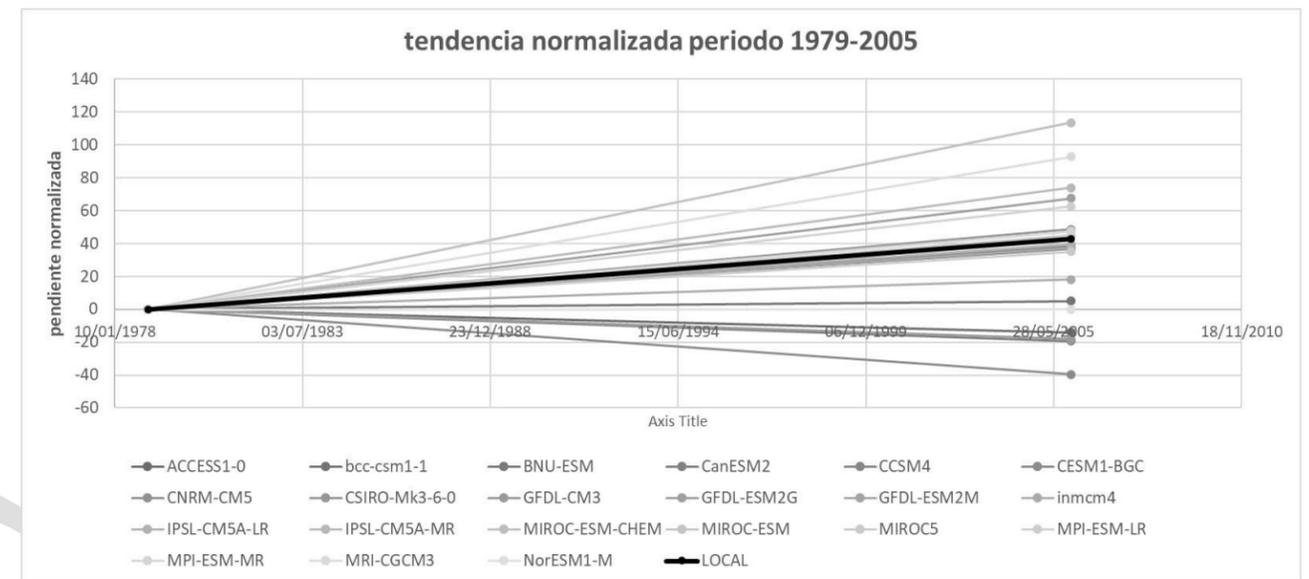
Las proyecciones históricas de los diferentes modelos climáticos, generalmente, reproducen bien la estacionalidad de la precipitación en la zona según las observaciones, como se puede observar en Figura 38. Las anomalías entre estas proyecciones y el observado se han utilizado como uno de los criterios de puntuación para la ponderación. De igual manera, la tendencia normalizada (Figura 39) y los extremos se han utilizado como criterios de ponderación. El resultado es un peso para cada modelo, que indica el ajuste que tiene aquel modelo con la serie observado, tomando en cuenta los tres criterios antes mencionados. Este peso se aplica a los modelos para el cálculo de la robustez.

Figura 38. Dispersión en la estacionalidad entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos locales



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 39. Dispersión en la tendencia normalizada entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos locales



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 40. Obtención de puntuación global y ordenación (e.j. para variable prec.)

Modelo	Criterio (desviación estadística)			Criterio (desviación normalizada)			Ponderación global			
	Estacionalid	Tendencia	Extremos	Estacionalid	Tendencia	Extremos	Total	1/Total	Orden	Peso
ACCESS1-0	130.80	3256.39	11.54	0.29	0.48	0.00	0.76	1.31	13	0.0290
bcc-csm1-1	101.73	1444.66	14.47	0.00	0.21	0.04	0.25	3.94	3	0.0874
BNU-ESM	107.33	35.66	19.33	0.06	0.00	0.11	0.17	5.82	1	0.1290
CanESM2	114.02	3869.55	36.76	0.12	0.57	0.36	1.05	0.95	16	0.0211
CCSM4	130.40	20.35	19.95	0.28	0.00	0.12	0.41	2.47	8	0.0547
CESM1-BGC	129.10	6814.86	48.03	0.27	1.00	0.52	1.79	0.56	20	0.0124
CNRM-CM5	116.73	14.10	13.13	0.15	0.00	0.02	0.17	5.82	2	0.1289
CSIRO-Mk3-6-0	135.21	33.19	41.70	0.33	0.00	0.43	0.77	1.30	14	0.0289
GFDL-CM3	203.45	3719.98	81.12	1.00	0.55	1.00	2.55	0.39	21	0.0087
GFDL-ESM2G	181.79	601.64	55.30	0.79	0.09	0.63	1.50	0.66	19	0.0147
GFDL-ESM2M	167.97	33.41	40.20	0.65	0.00	0.41	1.07	0.94	17	0.0208
inmcm4	117.42	621.93	36.47	0.15	0.09	0.36	0.60	1.66	11	0.0367
IPSL-CM5A-LR	126.31	11.32	22.31	0.24	0.00	0.15	0.40	2.52	7	0.0557
IPSL-CM5A-MR	141.89	961.04	46.31	0.39	0.14	0.50	1.04	0.97	15	0.0214
MIROC-ESM-CHEM	125.10	4978.44	20.70	0.23	0.73	0.13	1.09	0.92	18	0.0203
MIROC-ESM	119.68	3.79	26.48	0.18	0.00	0.21	0.39	2.56	6	0.0566
MIROC5	111.77	61.38	21.81	0.10	0.01	0.15	0.25	3.93	4	0.0870
MPI-ESM-LR	127.45	378.50	20.70	0.25	0.06	0.13	0.44	2.28	9	0.0504
MPI-ESM-MR	137.74	20.36	12.39	0.35	0.00	0.01	0.37	2.71	5	0.0601
MRI-CGCM3	108.38	2491.28	14.28	0.07	0.37	0.04	0.47	2.13	10	0.0471
NorESM1-M	120.32	1842.46	33.01	0.18	0.27	0.31	0.76	1.31	12	0.0291

Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.2.2.3 Regionalización mediante perturbación del clima histórico

El paso final del proceso de regionalización consiste en perturbar las series temporales históricas de precipitación y temperatura de cada subcuenca, con factores de cambio aditivos y multiplicativos en base al rango plausible obtenido de las proyecciones. Estas perturbaciones son necesarias para 1) conocer la respuesta del sistema sobre posibles futuros cambios de clima, 2) crear las superficies de respuesta climática (véase la sección 2.5) y, finalmente, 3) calcular la robustez. De este modo, se crea un gran número de posibles escenarios; muchos más que los que saldrían si utilizáramos el método tradicional “top-down”, es decir, utilizando las salidas directas de las proyecciones climáticas.

Para este análisis se han trabajado con:

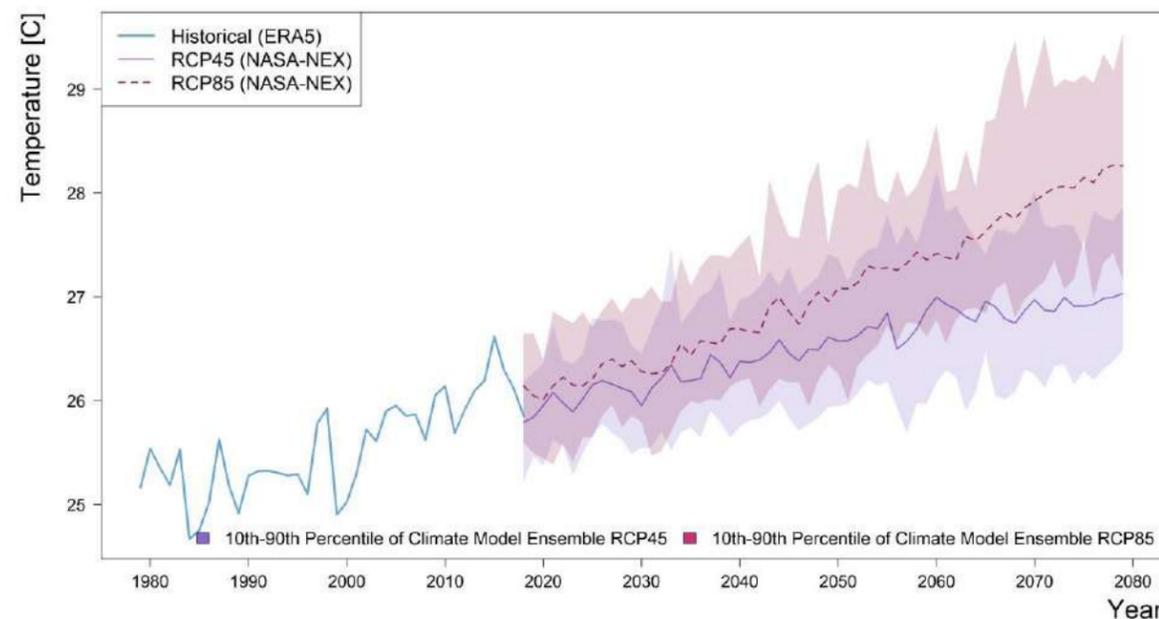
- Temperatura variándolo entre 0°C y 3,0°C en un total de 10 pasos.
- Precipitación variándolo entre -15% hasta +50% en un total de 18 pasos.
- Lo cual resulta en 10x18=180 escenarios climáticos a utilizar para forzar el modelo de simulación y conocer la sensibilidad climática sobre todo el rango de posibles cambios.

Más detalles sobre la aproximación metodológica de este tarea se encuentran en sección 2.5.

2.2.3 Identificación y caracterización del clima futuro

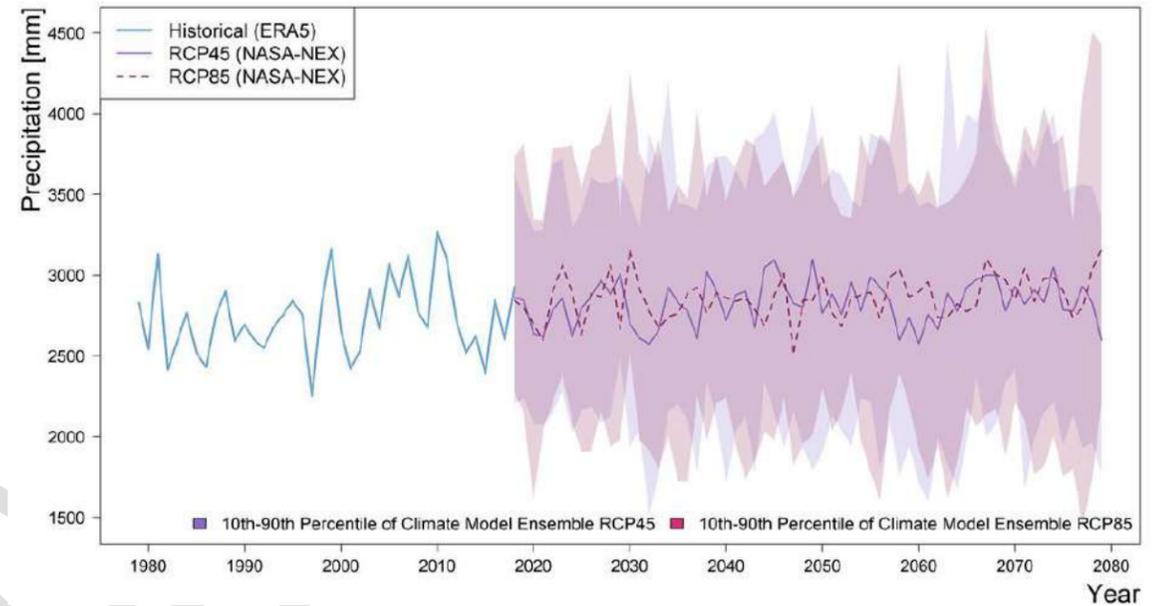
Esta sección identifica las variables e indicadores más relevantes para caracterizar el clima futuro. La Figura 41 y Figura 42 muestran como los modelos climáticos proyectan la temperatura y precipitación hasta el año 2080. Se puede apreciar que los modelos, para la trayectoria de emisiones de gases RCP8.5, predicen temperaturas bastante más altas que para RCP4.5, pero, en ambos casos, hay una tendencia positiva muy marcada y significativa. Para la precipitación, la señal de cambio es menos claro en esta representación gráfica. En la Figura 43 se visualizan los cambios medios en ambas variables (precipitación en eje x, temperatura en eje y).

Figura 41. Proyecciones climáticas de la temperatura hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5. El histórico



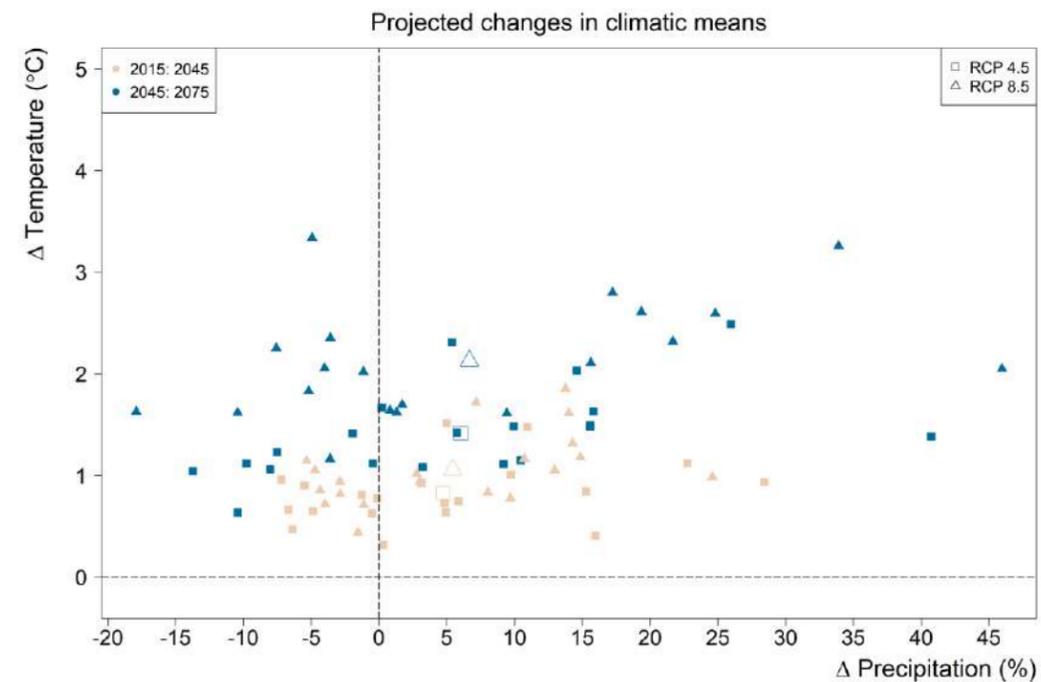
Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 42. Proyecciones climáticas de la precipitación hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5. El histórico



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

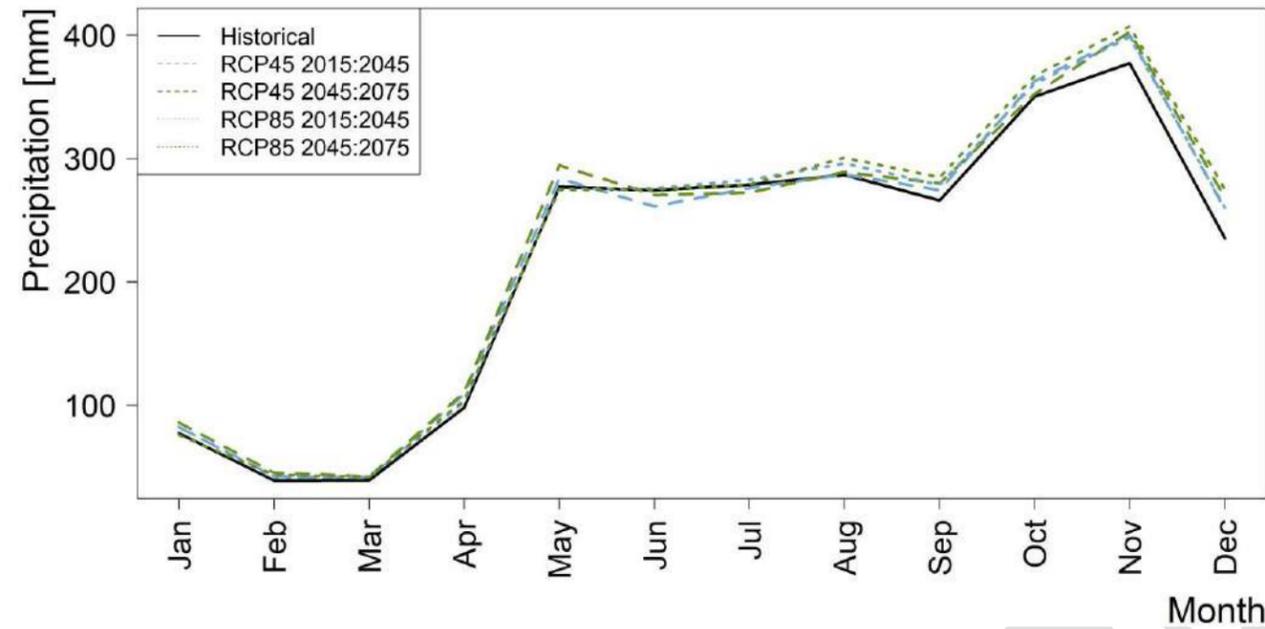
Figura 43. Cambios medios proyectadas en temperatura y precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

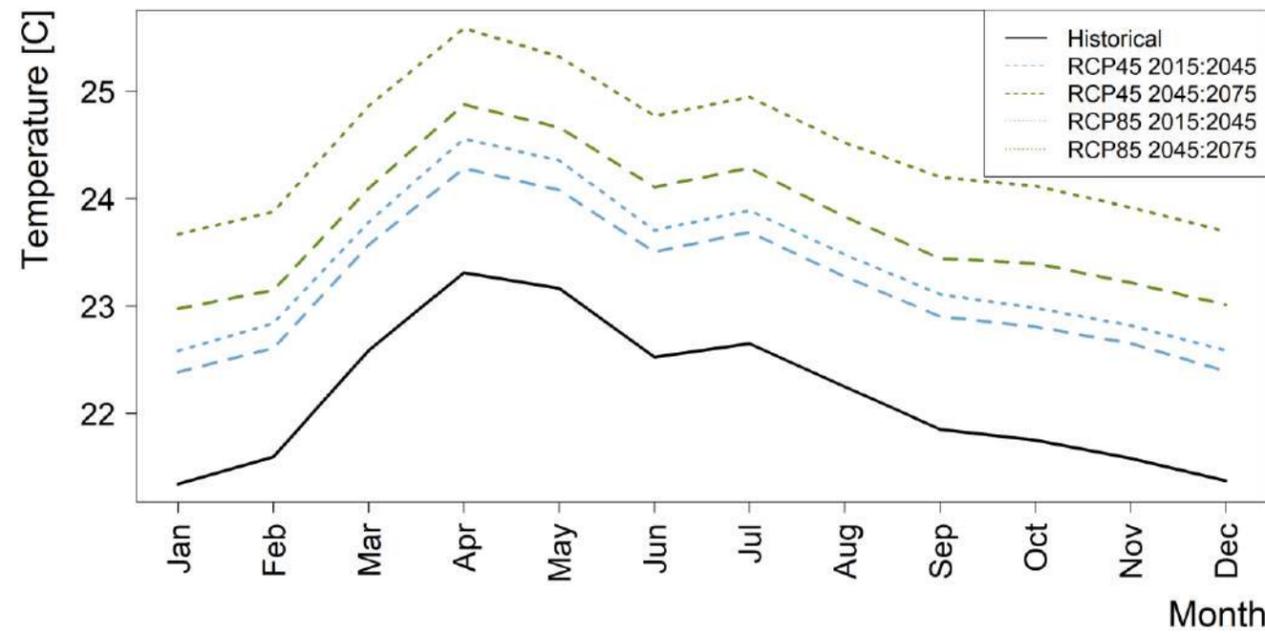
La Figura 44 y la Figura 45 muestran los cambios proyectados en la estacionalidad de la precipitación y temperatura. Se puede apreciar que el incremento de precipitación se proyecta, mayormente, en el mes más lluvioso (noviembre). En la temperatura no se observan cambios relevantes en la estacionalidad.

Figura 44. Cambios proyectados en la estacionalidad de la precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 45. Cambios proyectados en la estacionalidad de la temperatura para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

2.3 Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático

Los resultados de las proyecciones climáticas realizadas proporcionan información sobre los potenciales impactos climáticos, que la gestión de CHCP debe enfrentar estratégicamente en el corto y medio plazo.

El nivel de implicación con los desafíos climáticos por parte de la ACP se encuentra completamente alineado con lo establecido en la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Panamá ³ (CDN-1), actualizada y publicada en diciembre de 2020 por parte del Ministerio de Ambiente, en cumplimiento de los compromisos adquiridos ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

La CDN, que es el documento rector de la acción nacional en cuanto a desempeño climático se refiere, reconoce la relevancia estratégica que el Canal de Panamá y su Cuenca Hidrográfica presentan en términos socioeconómicos y ambientales para el país. A su vez, esboza cuáles son las principales amenazas climáticas que la Cuenca debe hacer frente y que se manifiestan en impactos evidentes, tales como: mayor probabilidad y ocurrencia de eventos extremos, escasez de recursos hídricos en periodos estivales, demanda de producción hidroeléctrica asociada al aumento de temperaturas máximas, o extensión de las superficies dedicadas a la producción agrícola.

Entre los compromisos definidos por la CDN para el Sector de Cuencas Hidrográficas se encuentra la culminación del proceso de elaboración del PIOTA para la CHCP, considerándolo como un referente para el resto de cuencas hidrográficas en el país, promoviendo un modelo de desarrollo territorial que integre el mantenimiento de los servicios ecosistémicos y, cuya aplicación en forma de infraestructura verde, pueda resultar en un aumento de la resiliencia, reducción de emisiones y aumento del almacenamiento de carbono a través de la reforestación, forestación, restauración de suelos, manejo sostenible de los bosques y la conservación de las reservas forestales de carbono.

Un elemento fundamental, a tener en cuenta -sin duda- a la hora de estructurar la propuesta de ordenamiento territorial para la CHCP, es disponer de un amplio entendimiento de los riesgos asociados a la variabilidad climática, que cabe esperar sobre sus sistemas naturales y humanos. En este capítulo se expone el Análisis de la Vulnerabilidad y Riesgo frente a amenazas Climáticas (AVRC) realizado. Este análisis de riesgo climático va a permitir una mayor comprensión de los potenciales peligros climáticos y sus potenciales impactos futuros, sobre su población, actividad productiva, infraestructuras y medio ambiente.

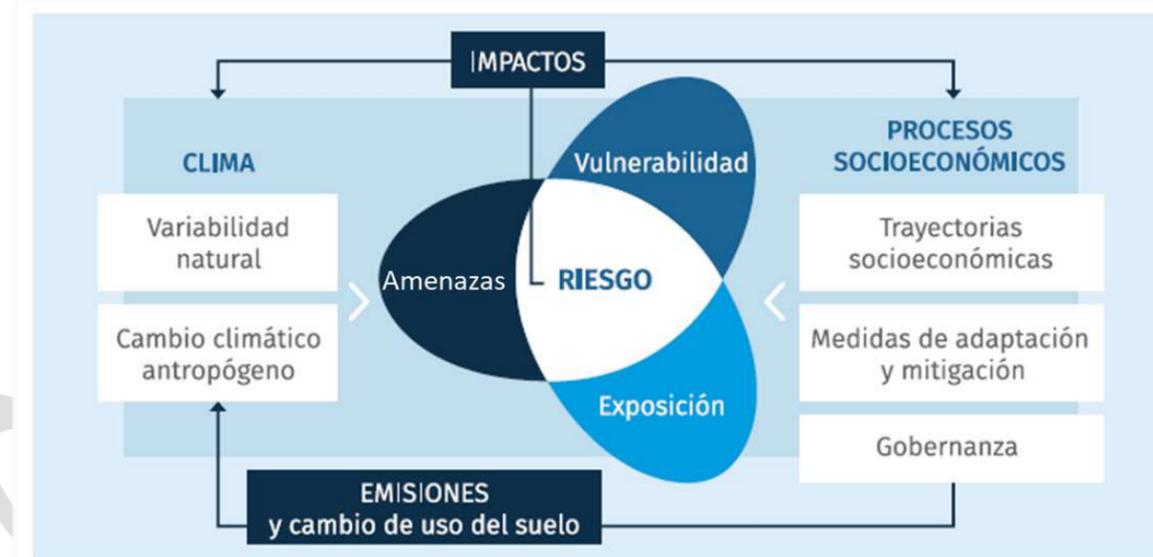
2.3.1 Metodología

El trabajo desarrollado toma y da continuidad al Análisis de riesgos realizado como parte de la fase Diagnóstico Integral, completado también como parte del proceso de construcción del PIOTA (capítulo 1.3 Análisis de riesgos), a través de la inclusión de la componente de clima futuro en el análisis.

Según define el Grupo Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC), el riesgo climático se compone de tres factores: amenaza, exposición y vulnerabilidad.

³MiAmbiente, 2020.
<https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Panama%20First/CDN1%20Actualizada%20Rep%C3%BAblica%20de%20Panam%C3%A1.pdf>

Figura 46. Conceptualización del riesgo climático



Fuente: Adaptado del Quinto Informe del IPCC (2014).

Por tanto, tal y como muestra la figura anterior, la existencia de un determinado riesgo climático viene dada por la coincidencia en el espacio/tiempo de tres elementos: exposición y vulnerabilidad para una determinada amenaza. El nivel o aceptabilidad del riesgo van a depender de la caracterización de estos tres factores, ya que determinan sus potenciales impacto. Es claro que elevados niveles de amenaza, exposición y vulnerabilidad implican alto riesgo.

La amenaza necesariamente obedece a un desencadenante climático y se caracteriza por su peligrosidad (recurrencia y severidad). Un ejemplo de amenaza corresponde a los eventos de inundaciones o deslizamientos, para los cuales se tiene un registro histórico de ocurrencia y se puede estimar su incidencia futura, bajo diversos escenarios de cambio climático. El grado de variabilidad climática condiciona el nivel de amenaza a considerar para periodos futuros. La exposición se corresponde con la localización de un posible elemento sensible en el ámbito de afección de la amenaza considerada. Sin exposición no hay riesgo.

El último de los elementos que caracterizan el riesgo climático es la vulnerabilidad. Este factor da una medida del potencial impacto asociado a una amenaza determinada sobre un receptor concreto (población, infraestructuras, actividades y servicios, medio ambiente), así como a su facultad de recuperación.

Aplicado a la CHCP, el ARVC se ha basado en la determinación de la exposición y vulnerabilidad de diferentes receptores sensibles frente a las amenazas con mayor potencial de impactar al desarrollo sostenible⁴ (inundaciones, deslizamientos y periodos de altas temperaturas), en el momento actual y en el futuro, a partir de las proyecciones realizadas, bajo diferentes escenarios climáticos, de los desencadenantes climáticos que condicionan la peligrosidad de las amenazas consideradas.

El análisis de vulnerabilidad se completa en base a los resultados del Diagnóstico, extractando la información necesaria para determinar las cadenas de impacto asociadas a cada amenaza. La estimación del riesgo climático se ha realizado en función de la superposición de la vulnerabilidad y las amenazas estudiadas. Este análisis tiene como resultado principal un conjunto de mapas de clasificación de zonas por subcuencas y corregimientos, considerando los

⁴ Los riesgos climáticos, asociados a la posible evolución del balance hídrico de la Cuenca y sus rutas de adaptación asociadas, constituyen uno de los principales ejes articuladores de la elaboración del PIOTA, y reciben especial atención a lo largo del resto de apartados del presente documento.

riesgos a fenómenos naturales extremos y de cambio climático. Este trabajo se ha realizado por medio de indicadores espaciales, operados con un sistema de información geográfica (GIS).

2.3.1.1 Variabilidad climática de las amenazas consideradas

En este análisis se ha evaluado el grado de variabilidad climática de cada amenaza considerada, permitiendo evaluar la evolución temporal de parámetros termopluviométricos con respecto al periodo histórico. El incremento de la peligrosidad, de cada amenaza, se calcula en función de la evolución temporal de una serie de desencadenantes climáticos, representados por una serie de estadísticos definidos por el Panel de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés), y divulgados a través de la iniciativa Climdex⁵, para caracterizar sequías, lluvias intensas, heladas y altas temperaturas.

Por un lado, la variabilidad de las lluvias intensas, que determinan eventos de inundaciones y deslizamientos, se analizan mediante el índice de número de días muy húmedos (R95p), considerando como días húmedos aquellos en los que la precipitación es superior al percentil 95 (WMO, 2009). Por otro, la variabilidad de los periodos de altas temperaturas, que determinan eventos de olas de calor, se analiza mediante el índice de días cálidos (WSDI, por sus siglas en inglés *Warm Spell Duration Index*), que representa el número de días al año que forman parte de una secuencia de al menos seis días consecutivos con la temperatura máxima mayor al percentil 90 del total de registros (WMO, 2019).

Para generar estos estadísticos, se han utilizado las Proyecciones Climáticas de Precipitación y Temperatura NASA-NEX descritas en el apartado 2.2, con una resolución espacial de 25x25 km. Se consideran tres periodos temporales: el histórico o periodo de referencia (1979-2005), un escenario futuro de corto plazo (2015-2045) y otro de medio/largo plazo (2055-2085); esto bajo dos escenarios de cambio climático, uno intermedio (RCP 4.5)-y uno pesimista (RCP 8.5). Para el cálculo de estadísticos se ha utilizado el ensamble de los 21 modelos que contiene el conjunto de datos NASA-NEX, mediante la media ponderada en base a los resultados obtenidos en el apartado 2.2.

Para determinar su evolución en el tiempo, y poder asociar un nivel de amenaza, se utilizan las proyecciones climáticas y, de este modo, calcular el porcentaje de cambio del índice de los periodos futuros (2015-2045 y 2055-2085) y escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), con respecto al periodo histórico (1979-2005), a través de las siguientes fórmulas para cada índice, respectivamente:

$$\text{Porcentaje de cambio de R95p (\%)} = \frac{(R95p_{\text{periodo futuro}} - R95p_{\text{periodo histórico}})}{R95p_{\text{periodo histórico}}} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de cambio de WSDI (\%)} = \frac{(WSDI_{\text{periodo futuro}} - WSDI_{\text{periodo histórico}})}{WSDI_{\text{periodo histórico}}} \times 100$$

El porcentaje de cambio, con respecto al periodo histórico 1979-2005, de los índices anteriores ha sido reclasificado con el objetivo de categorizar el incremento de peligrosidad de cada amenaza tal y como se muestra a continuación en las Tabla 23 y Tabla 24:

Tabla 23. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas

Índice	Porcentaje de cambio respecto al histórico (%)	Incremento de peligrosidad
R95p	x <= 0	Nulo
	25% < x <= 50%	Bajo
	50% < x <= 75%	Medio
	75% < x <= 100	Alto
	x > 100%	Muy Alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 24. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a periodos de altas temperaturas

Índice	Porcentaje de cambio respecto al histórico (%)	Incremento de peligrosidad
WSDI	x <= 0	Nulo
	25% < x <= 50%	Bajo
	50% < x <= 75%	Medio
	75% < x <= 100	Alto
	x > 100%	Muy Alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Con estos elementos y el análisis de la peligrosidad actual de cada amenaza, recogido en la etapa de Diagnóstico, se ha construido el siguiente indicador combinado de nivel de amenaza para inundaciones y deslizamientos:

Tabla 25. Nivel de amenaza climática asociada a inundaciones y deslizamientos

Amenaza actual muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta
Amenaza actual alta	Amenaza alta	Amenaza alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta
Amenaza actual media	Amenaza media	Amenaza media	Amenaza alta	Amenaza alto	Amenaza muy alta
Amenaza actual baja	Amenaza baja	Amenaza baja	Amenaza media	Amenaza media	Amenaza muy alta
	Incremento de peligrosidad nulo	Incremento de peligrosidad bajo	Incremento de peligrosidad medio	Incremento de peligrosidad alto	Incremento de peligrosidad muy alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Por su parte, los niveles de amenaza considerados para olas de calor se corresponden con los de la siguiente tabla:

⁵ <https://www.climdex.org/>

Tabla 26. Categorización del nivel de amenaza climática asociada a periodos de altas temperaturas

Incremento de peligrosidad	Rango de clasificación	Nivel de amenaza climática
Nulo	1.00 - 2.00	Nulo
Bajo	2.00 – 2.49	Amenaza baja
Medio	2.50 – 2.99	Amenaza media
Alto	> 3.00	Amenaza alta
Muy Alto		Amenaza muy alta

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.3.1.2 Vulnerabilidad y riesgo

En el capítulo 1.3 Análisis de riesgos del Diagnóstico, se evaluaron cuatro aspectos clave de la vulnerabilidad (físico, social, económico y ambiental-ecológico) que permiten analizar el riesgo climático desde diferentes perspectivas. Su cálculo se realizó a escala de lugares poblados, resultando en un total de 289, de acuerdo con la información disponible del censo correspondiente al 2010. En este apartado se hace uso de la vulnerabilidad combinada calculada en la etapa del Diagnóstico tal y como se describe a continuación.

Para realizar el análisis de vulnerabilidad se asignaron pesos a cada componente de variabilidad, conforme a la Tabla 27:

Tabla 27. Variables vinculadas a la valoración de la vulnerabilidad

Componente de vulnerabilidad	Variable	Nivel de vulnerabilidad				Peso
		Baja 1	Media 2	Alta 3	Muy alta 4	
Vulnerabilidad Física	(A) Porcentaje de viviendas con piso de Tierra	0-10% del total de viviendas poseen piso de tierra	10-25% del total de viviendas poseen piso de tierra	25-50% o más del total de viviendas poseen piso de tierra	50% o más del total de viviendas poseen piso de tierra	5
	(B) Porcentaje de viviendas sin televisor	0-10% del total de viviendas no poseen televisor	10-25% del total de viviendas no poseen televisor	25-50% o más del total de viviendas no poseen televisor	50% o más del total de viviendas no poseen televisor	2
	(C) Porcentaje de viviendas sin teléfono residencial	0-10% del total de viviendas no poseen teléfono residencial	10-25% del total de viviendas no poseen teléfono residencial	25-50% o más del total de viviendas no poseen teléfono residencial	50% o más del total de viviendas no poseen teléfono residencial	2
Vulnerabilidad Social	(D) Porcentaje de población con menos de 18 años	0-10% del total de la población es menor a 18 años	10-20% del total de la población es menor a	20-30% o más del total de la población es menor a	>30% o más del total de la población es menor a	3

Componente de vulnerabilidad	Variable	Nivel de vulnerabilidad				Peso
		Baja 1	Media 2	Alta 3	Muy alta 4	
Vulnerabilidad Económica	(E) Porcentaje de población analfabeta	0% del total de la población analfabeta	0-5% del total de la población analfabeta	5-10% o más del total de la población analfabeta	>10% o más del total de la población analfabeta	3
	(F) Porcentaje de población Ocupada se encuentra ocupada	+50% o más del total de la población se encuentra ocupada	25-50% del total de la población se encuentra ocupada	10-25% del total de la población se encuentra ocupada	0-10% del total de la población se encuentra ocupada	4
Vulnerabilidad ambiental y ecológica	(G) Distancia de los lugares poblados a cauces de ríos principales	El lugar poblado se encuentra a más de 200 m del cauce del río	El lugar poblado se encuentra a menos de 100 m del cauce del río (entre 100 m y 200 m)	El lugar poblado se encuentra a menos de 500 m del cauce del río (entre 50 y 100 m)	El lugar poblado se encuentra a menos de 50 m del cauce del río	5
	(H) Distancia de los lugares poblados a cauces de ríos secundarios y quebradas	El lugar poblado se encuentra a más de 100 m del cauce del río o quebrada	El lugar poblado se encuentra a menos de 100 m del cauce del río o quebrada (entre 50 m y 100 m)	El lugar poblado se encuentra a menos de 50 m del cauce del río o quebrada (entre 25 y 50 m)	El lugar poblado se encuentra a menos de 25 m del cauce del río o quebrada	5
	(I) Localización de los lugares poblados en terrenos con fuertes pendientes	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes inferiores al 7%	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes entre 7-12%	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes entre 12-25%	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes superiores a 25%	5

Fuente: Equipo Redactor PIOTA, 2020

La vulnerabilidad combinada resultante surgía del sumatorio lineal ponderado de las variables que la componen, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Vulnerabilidad combinada: } ((A*5) + (B*2) + (C*2) + (D*3) + (E*3) + (F*4) + (G*5) + (H*5) + (I*5))/29$$

La vulnerabilidad resultante muestra una estratificación en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyos valores se clasificaron de acuerdo con los rangos de clasificación descritos en la siguiente tabla:

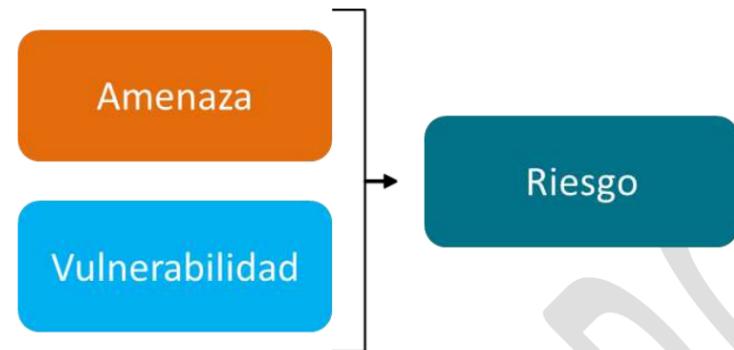
Tabla 28. Rango de clasificación de la vulnerabilidad

Rango de clasificación	Vulnerabilidad
1.00 - 2.00	Vulnerabilidad Baja
2.00 – 2.49	Vulnerabilidad Media
2.50 – 2.99	Vulnerabilidad Alta
> 3.00	Vulnerabilidad Muy Alta

Fuente: Equipo Redactor PIOTA, 2021

Por último, la estimación del riesgo climático se ha realizado en función de la superposición de la vulnerabilidad y las amenazas (con la exposición implícita) estudiadas.

Figura 47. Variables utilizadas para la determinación del Riesgo Climático



Fuente: Equipo Redactor PIOTA, 2021

En la siguiente tabla se muestra la matriz de amenaza y vulnerabilidad, utilizada para estimar el riesgo climático.

Tabla 29. Matriz de amenaza y vulnerabilidad

	Vulnerabilidad baja	Vulnerabilidad media	Vulnerabilidad alta	Vulnerabilidad muy alta
Amenaza muy alta	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo muy alto	Riesgo muy alto
Amenaza alta	Riesgo medio	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo muy alto
Amenaza media	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo alto
Amenaza baja	Riesgo bajo	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto

	Riesgo bajo (1-2)
	Riesgo medio (2-3)
	Riesgo alto (3-3.5)
	Riesgo muy alto (> 3.5)

Fuente: Equipo Redactor PIOTA, 2020

2.3.2 Caracterización de la amenaza climática

Capítulo en desarrollo – Inclusión de la componente climática (RCPs y horizontes temporales correspondientes) en la caracterización de las amenazas consideradas en el Diagnóstico

2.3.3 Categorización y clasificación espacial del riesgo climático por subcuencas y corregimientos

Capítulo en desarrollo – Análisis bajo GIS para presentar mapas de riesgo siguiendo la metodología planteada en Diagnóstico y clasificando tanto por subcuencas como por corregimientos

2.3.4 Lineamientos para la adaptación

Capítulo en desarrollo – A partir de los resultados obtenidos del apartado anterior, se planteará un conjunto de medidas de adaptación orientadas a reducir los riesgos climáticos por inundaciones, deslizamientos y períodos de altas temperaturas

2.4 Escenarios de desarrollo territorial

2.4.1 Prospectiva: Identificación, análisis y prospectiva de variables básicas

Para la creación de los escenarios de desarrollo territorial y de demanda de agua es necesario primero conocer las variables básicas a considerar, así como su evolución temporal. En los siguientes apartados se muestra la prospectiva de estas variables básicas que sirven de partida para construir los escenarios de desarrollo territorial.

La prospectiva es un enfoque o una forma de ver el desarrollo territorial y urbano del ámbito de intervención de la CHCP de cara al futuro. Se trata de plantear el modelo territorial futuro a partir de las variables claves analizadas en la etapa del diagnóstico (la conformación del territorio, la articulación espacial y el funcionamiento de las diversas actividades que se desarrollan en la CHCP, entre otras). Así, se pueden proponer hipótesis de evolución de estas variables para modelizar el futuro, mediante el desarrollo de escenarios, con horizonte en los años del PIOTA (2025, 2030, 2040 y 2070).

Tras el análisis de las variables se da comienzo a la construcción de los escenarios, el cual considera:

- un escenario tendencial, es decir sin ningún tipo de intervención desde el punto de vista de la planificación de actividades sobre el territorio;
- un escenario ambicioso u optimista que es la situación territorial idealizada con todos los criterios/elementos de planificación óptimos;
- un escenario posible o de consenso, que conjuga los dos escenarios anteriores, y que es posible compatibilizando lo que desea la población y los recursos con los que se cuenta.

2.4.1.1 Prospectiva de las demandas de agua

En este apartado se detallará cómo se obtuvieron los valores de las demandas para cada uno de los usos que extraen el agua de la CHCP.

2.4.1.1.1 Agua potable para consumo humano

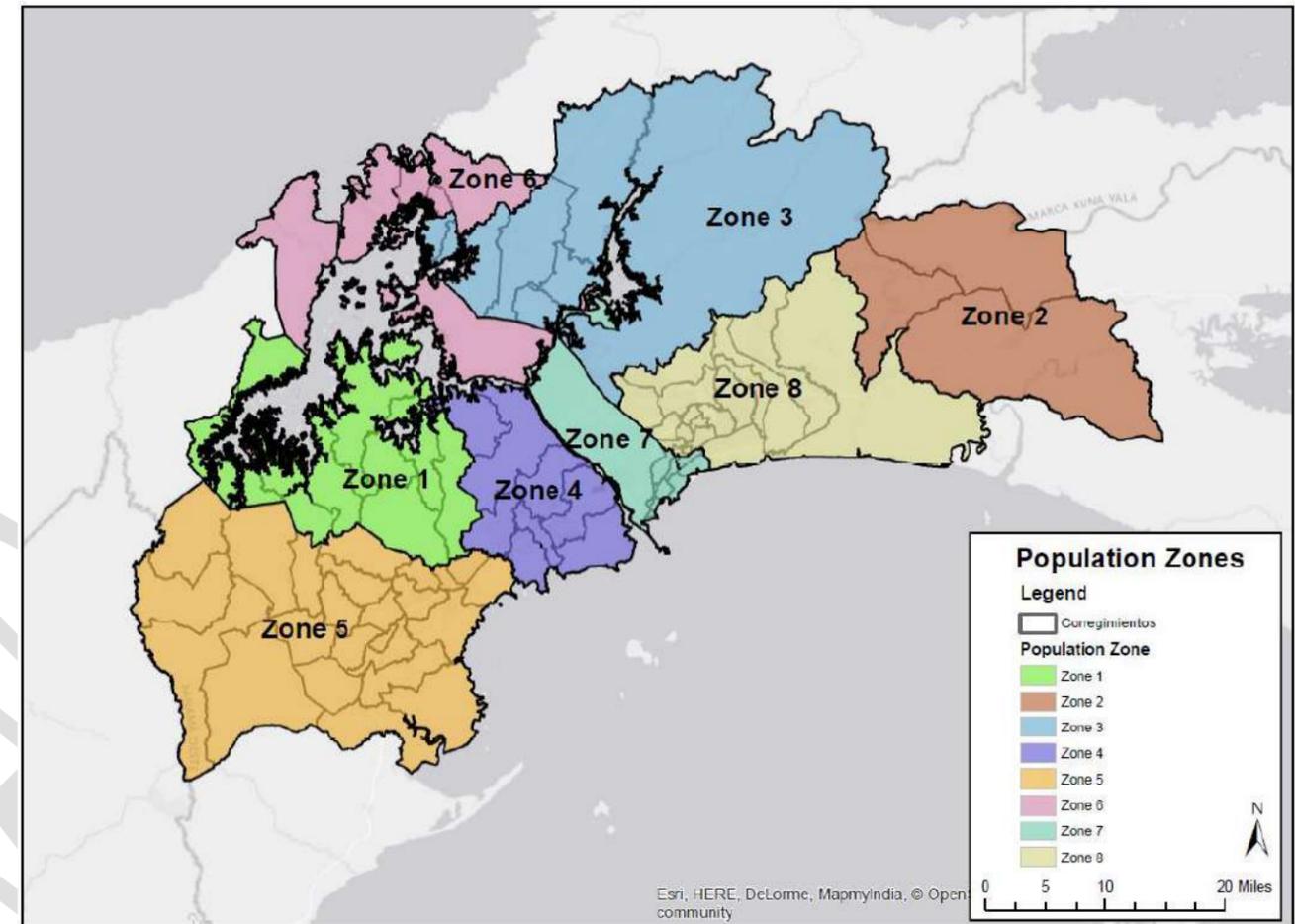
En la República de Panamá más de un 55% de los habitantes son abastecidos de agua proveniente de la CHCP. En términos generales, para estimar los requerimientos del uso del agua para consumo humano es fundamental conocer:

- La población por abastecer
- Las demandas netas por habitante
- Los subsistemas de abastecimiento
- Las pérdidas en los sistemas de distribución

Para la determinación de la población por abastecer se consideraron las 8 “zonas poblacionales” tomadas del estudio de Stantec⁶. Estas 8 zonas se componen de un total de 87 corregimientos que, de acuerdo con el estudio citado, son todos abastecidas por agua extraída de la CHCP, ya sea por medio de acueductos públicos o rurales.

⁶ STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

Figura 48. Zonas poblacionales estudio Stantec



Fuente: estudio Stantec, 2018

Conociendo ya la población a servir⁷, es necesario conocer los patrones de consumo de agua potable. Para este propósito, en el estudio de Stantec se dividen los corregimientos por tres tipos de categorías: urbanos, suburbanos y rurales. A cada una de estas categorías se le asocia un consumo per cápita de agua potable.

Tabla 30. Consumo per cápita de agua potable (en gal./hab./día) por tipo de conexión y categoría poblacional

Conexión	Categoría	Bajo	Medio	Alto
Contabilizada	Urbana	69	83	93
	Surbana	55	63	75
	Rural	34	42	45
No contabilizada	Urbana	111	160	232
	Surbana	111	160	232
	Rural	111	160	232

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec, 2021

⁷ La cantidad de habitantes fueron estimados a nivel de corregimientos gracias a los datos del INEC.

Además, otra consideración para determinar la dotación por habitante, fueron los porcentajes del agua contabilizada y no contabilizada por tipo de población (urbana, suburbana y rural). A continuación, se muestran los datos tomados en cuenta en el modelo:

Tabla 31. Porcentajes del agua contabilizada y no contabilizada por categoría poblacional

Categoría	Agua contabilizada (%)	Agua no contabilizada (%)
Urbana	61	39
Suburbana	40	60
Rural	50	50

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec, 2021

Finalmente, se obtuvieron las demandas per cápita de agua potable para cada tipo de categoría poblacional, siguiendo una distribución de los patrones de consumo de: 25% bajo, 50% medio y 25% alto. A continuación, se muestran los resultados de las demandas per cápita de agua potable por tipo de categoría poblacional consideradas para el escenario tendencial:

Tabla 32. Demanda per cápita de agua potable para el escenario tendencial

Categoría	Consumo medio (gal./hab./día)	Consumo medio (lts./hab./día)
Urbana	115	434
Suburbana	125	473
Rural	103	391

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec, 2021

Al disponer de las demandas per cápita de agua potable para cada categoría de población (urbana, suburbana y rural), ahora es necesario conocer la fuente de agua que abastece a cada zona poblacional. El criterio que se tomó en cuenta es que las poblaciones urbanas y suburbanas son servidas por los acueductos públicos del IDAAN y, por ende, el origen de sus aguas son los embalses Gatún y Alhajuela, donde se extrae el agua cruda para las potabilizadoras⁸. Por otro lado, las poblaciones rurales, son abastecidas por los acueductos rurales y se consideró que la fuente de agua son los cuerpos de agua de las subcuencas donde se localizan los corregimientos rurales.

De este análisis se obtuvo que los corregimientos urbanos y suburbanos de las zonas 2, 3, 4, 5 y 6 son abastecidos por el sistema del embalse Gatún, mientras que los corregimientos urbanos y suburbanos de las zonas 7 y 8 (localizados en la provincia de Panamá) son abastecidos por el sistema del embalse Alhajuela. En cambio, la población rural se abastece de agua proveniente de sus mismas subcuencas. Los corregimientos rurales se localizaron dentro de las siguientes subcuencas: Gatún Sur, Gatún Norte, Chagres, Trinidad y Cirí Grande.

De acuerdo con las clasificaciones del estudio de Stantec, de los 87 corregimientos considerados, 16 son urbanos, 43 suburbanos y 28 rurales. A continuación, se muestra la distribución de la población urbana y suburbana para cada una de las zonas poblacionales y la dotación per cápita estimada:

Tabla 33. Dotación per cápita por zona poblacional

Zona poblacional	Distribución poblacional		Dotación per cápita de agua potable	
	Suburbana (%)	Urbana (%)	Gal./hab./día	Lts./hab./día
Zona 2	100	0	125	473
Zona 3	100	0	125	473

⁸ Federico Guardia Conte (Chilibre) extrae agua del embalse Alhajuela mientras que Monte Esperanza, Miraflores, Laguna Alta, Antonio Yepes de León (Sabanitas), Mendoza y Escobal extraen agua del embalse Gatún.

Zona población	Distribución poblacional		Dotación per cápita de agua potable	
	Suburbana (%)	Urbana (%)	Gal./hab./día	Lts./hab./día
Zona 4	100	0	125	473
Zona 5	100	0	125	473
Zona 6	11	89	116	438
Zona 7	14	86	116	440
Zona 8	100	0	125	473

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec y del INEC

La dotación per cápita de agua potable para los corregimientos rurales es de 391 lts./hab./día.

Por último, otro factor que está directamente ligado al uso del agua potable para consumo humano es la eficiencia de los sistemas de distribución. Actualmente las pérdidas en los sistemas de distribución son de cerca de un 35% y este valor fue el considerado en el escenario tendencial.

2.4.1.1.2 Agua para la operación del Canal (transportación)

El Canal de Panamá es mundialmente reconocido por ser una ruta de navegación para el transporte marítimo, y para estos propósitos la ACP opera los sistemas de esclusas: Panamax y Neo Panamax. La ACP, a través de la Sección de Meteorología e Hidrología (HIAM), ha realizado el ejercicio de proyectar las demandas de agua de las esclusas del Canal. En estas proyecciones diferencian las demandas esperadas para cada sistema: Panamax y Neo Panamax.

A su vez, la ACP ha generado dos escenarios que afectan únicamente al sistema Neo Panamax:

- El primer escenario que plantean es el llamado “con flushing”, este considera que durante los meses de julio a diciembre no se utilizan las tinas de ahorro de agua en las esclusas Agua Clara y Cocolí.
- El segundo escenario llamado “sin flushing”, por otro lado, plantea que las tinas de ahorro de agua se utilizan todo el año.

A continuación, se muestran las demandas de agua proyectadas para la navegación por tipo de esclusaje para los diferentes horizontes planteados en el presente estudio:

Tabla 34. Demandas de agua para la navegación por tipo de esclusaje y escenario

Año	Panamax		Neo Panamax (con flushing)		Neo Panamax (sin flushing)	
	Esclusajes Panamax equivalentes / día	Millones de metros cúbicos / día	Esclusajes Panamax equivalentes / día	Millones de metros cúbicos / día	Esclusajes Panamax equivalentes / día	Millones de metros cúbicos / día
2025	24.44	5.09	25.73	5.36	19.17	3.99
2030	25.99	5.41	29.31	6.10	21.98	4.58
2040	26.59	5.54	32.01	6.66	24.10	5.02
2070	26.59	5.54	32.01	6.66	24.10	5.02

Fuente: Sección de Meteorología e Hidrología (HIAM), ACP

Es importante comentar que un esclusaje Panamax equivalente utiliza un volumen de 55 millones de galones de agua, y que la HIAM supone que para el año 2034 no aumentará más la demanda de las esclusas.

2.4.1.1.3 Agua para uso industrial

La industria es otro de los sectores que hacen uso del agua de la CHCP. Esta agua se demanda por las industrias ya sea para la elaboración de sus productos, mantenimiento de sus materiales y equipos, etc. Una forma de determinar el suministro de agua industrial es con base a los requerimientos medios que se realizan en las industrias de acuerdo con sus superficies. Es decir, que se puede asociar un consumo medio de agua por superficie de suelo industrial. Del análisis se considerará la superficie industrial dentro de la CHCP, así como las industrias que se localizan en las ciudades de Colón y Panamá.

La dotación de agua para el uso industrial considerada en el estudio es la equivalente a un gasto máximo horario de 1 l/s por hectárea⁹. Es decir, que cada hectárea de área industrial demandará 31,536 m³/año.

De acuerdo con la información recabada, la gran mayoría de las industrias están conectadas al suministro municipal. Por ello, en la modelización se considerará que las demandas industriales serán abastecidas por las redes de distribución y, por ende, se estimarán las mismas pérdidas (35%) que las consideradas para el consumo humano.

2.4.1.1.4 Agua para uso agropecuario

El sector agropecuario es otro de los sectores que consumo agua de la CHCP. Referente a la agricultura, los cultivos de piña y café son los más extensos dentro de la Cuenca. Por ello, son los dos cultivos que se consideraron en el análisis. Por otro lado, el consumo de agua del ganado vacuno fue el considerado en la modelización y este se relaciona con las superficies de pasto dentro de la CHCP.

Demanda agrícola de agua de los cultivos de piña y café

El cálculo de la demanda agrícola de estos dos cultivos permanentes se realizó con base en los valores utilizados en el Reporte de determinación del balance hídrico y caudal ambiental de la Cuenca del Río Indio¹⁰ (contigua a la CHCP), elaborado por el consultor Environmental Resources Management (ERM).

Para la determinación del requerimiento de agua del cultivo se aplicó la siguiente fórmula:

$$Da = 10 \frac{[(Kc \times ETp) - \frac{(P \times Ke)}{100}]}{Kr}$$

En donde,

- Da: requerimiento de agua del cultivo (m³/ha)
- 10: es el factor que aplica para convertir a m³/ha
- Kc: coeficiente de cultivo
- ETp: evapotranspiración de referencia potencial
- P: precipitación en mm
- Ke: coeficiente de escorrentía
- Kr: coeficiente de eficiencia de riego

A continuación, se muestran los valores considerados y el resultado del requerimiento de agua por superficie para los cultivos de piña y café de la cuenca:

Tabla 35. Demanda agrícola de agua de cultivos de piña y café

Variable	Unidad de medida	Piña	Café
Kc	-	0.5	1.09
ETp	mm/año	1,567	1,567
P	mm/año	2,500	2,500
Ke	-	0.542	0.542
Kr	-	0.65	0.65
Da	m³/ha	11,845	26,069

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de ERM

Demanda pecuaria de agua del ganado vacuno

De acuerdo con datos obtenidos del Censo Agropecuario 2011, el hato ganadero de la Cuenca estaba conformado por unas 90,177 cabezas, de las cuales el 49.5% eran vacas, el 28.6% novillos y novillas y el 15.9% son terneros y terneras, los bueyes, toros y toretes apenas alcanzaban el 6% del ganado vacuno. Se estimaba, al 2012, una ocupación de 73,358 hectáreas de suelo de pastos asociados al sector pecuario dentro de la CHCP.

El ciclo de vida del ganado se ordena en la fase de cría (terneros y terneras), engorde (novillos, novillas y toretes) y terminación (toros, bueyes y vacas). En la siguiente tabla se destaca el consumo de agua por animal según su tipo:

Tabla 36. Consumo de agua por cabeza de ganado vacuno al año (según tipo de animal)

Tiempo	Cría Terneros y terneras	Engorde			Madurez o terminación		
		Novillos	Novillas	Toretos	Toros	Bueyes	Vacas
Año (m ³)	9	16	16	20	25	22	32

Fuente: Estimación de la demanda de Agua (IDEAM 2010, Colombia) y Estimación de la demanda de agua (SAGARPA 2010, México)

Es ahora posible determinar el consumo de agua del ganado vacuno según tipo de animal. A continuación, se muestran los consumos de agua para el año 2011.

Tabla 37. Consumo de agua de ganado vacuno (m3) en la CHCP (año 2011)

Total	Cría Terneros y terneras	Engorde			Madurez o terminación		
		Novillos	Novillas	Toretos	Toros	Bueyes	Vacas
2,092,872	129,267	201,184	211,200	45,280	72,075	5,962	1,427,904

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos del Censo Agropecuario 2011

A su vez, existe un consumo de agua asociado a los establos y otras instalaciones de atención al ganado el cual se consideró de 40 litros/día por cabeza de ganado¹¹.

De los resultados del hato ganadero del 2011 se determinó que se consumió un total de 3,409,456 m³, repartidos en 2,092,872 m³ de consumo del ganado y 1,316,584 m³ de consumo asociado a los establos.

⁹ Dicha dotación es la recomendada por la Norma Mexicana NMX-R-046-SCFI-2015 para parques industriales
¹⁰ Este reporte forma parte del "Estudio para la elaboración del diseño conceptual del reservorio multipropósito en la Cuenca de Río Indio y proyectos complementarios para el manejo de la cuenca" celebrado entre el Ministerio de Ambiente y la Autoridad del Canal de Panamá

¹¹ Unidades de consumo: Melguizo B., Samuel. Fundamentos de Hidráulica e Instalaciones de abasto en las edificaciones. Centro de Publicaciones Universidad Nacional Medellín.

Con esta información y con la superficie de suelo pecuario (pasto) es ahora posible medir la tasa de cabezas de ganado por superficie, así como el requerimiento de agua para el ganado vacuno por superficie. Se obtuvo que en la CHCP se tiene un promedio de 1.23 cabezas de ganado por cada hectárea de pasto. Así como se demanda un consumo de 46.47 m³/año por hectárea de pasto.

2.4.1.2 Prospectiva demográfica

En este apartado se detalla cómo se obtuvo la proyección demográfica de la CHCP y los corregimientos que extraen el agua de esta, agrupados por zonas de atención hídrica.

2.4.1.2.1 Población en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá - CHCP

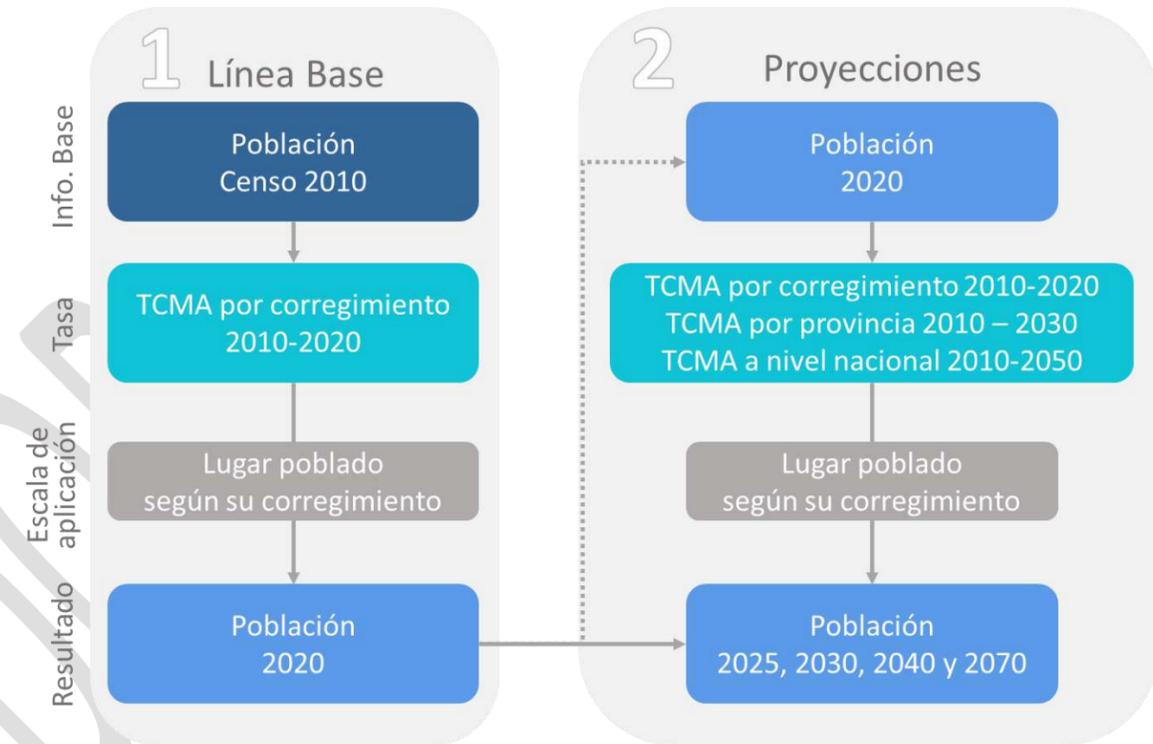
La proyección de población de la CHCP se realiza en dos fases, la primera se refiere a la construcción de la línea base, es decir, el cálculo de la población actual (año 2020) y la segunda a la proyección de esta población en cuatro horizontes temporales 2025, 2030, 2040 y 2070.

Para la proyección de la población al año 2020, se utiliza como base la población de la CHCP según el Censo 2010 y se aplica la Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) de cada corregimiento obtenida de las proyecciones del INEC (Año 2010 – 2020), y aplicada a cada lugar poblado de la CHCP según su localización dentro del corregimiento respectivo.

Una vez construida esta línea base, se proyecta la población 2020 a los diferentes horizontes temporales (2025, 2030, 2040 y 2070), aplicando una Tasa de Crecimiento Medio Anual, a razón del promedio de tres tasas oficiales calculadas por el INEC, según nivel de segregación territorial y horizonte temporal. Estas tres tasas de crecimiento permiten obtener la media de desarrollo de la población, teniendo en cuenta diferentes horizontes ,y su evolución de cara al futuro:

- TCMA de cada corregimiento, calculada por el INEC desde el año 2010 hasta el año 2020.
- TCMA de cada provincia, calculada por el INEC desde el año 2010 hasta el año 2030. Teniendo en cuenta que la división política-administrativa vigente al momento de la proyección únicamente incluía la provincia de Panamá y Colón.
- TCMA a nivel nacional, calculada por el INEC desde el año 2010-2050.

Figura 49. Esquema de metodología utilizada para la proyección de población de la CHCP



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tal y como se observa en la siguiente tabla, la TCMA varía de acuerdo con los patrones de crecimiento de cada corregimiento, lo que permite identificar cuáles son los sectores que se están desarrollando con mayor rapidez y su vinculación con las condiciones territoriales que los representan. Al igual que en la primera fase, cada lugar poblado ha sido proyectado según la TCMA del corregimiento del cual forma parte.

En general, la TCMA tendencial de la CHCP es de 1.77% siendo en promedio para el distrito de Panamá un 2.44%, Arraiján 1.91%, Capira 1.53%, La Chorrera 1.69% y Colón 1.62%. Específicamente, resalta el corregimiento de Ancón con la mayor TCMA de todos los corregimientos que forman parte de la CHCP con 2,80% superior a la media distrital, seguido se encuentran los corregimientos 24 de Diciembre, Herrera y Alcalde Díaz con TCMA en torno a los 2.5%.

Tabla 38. Tasa de Crecimiento Media Anual por corregimiento de la CHCP

Distrito	Corregimiento	Censo 2010	Proyección 2020	Tasa de crecimiento			TCMA
				Total	Corregimiento (2010-2020)	Provincia (2010-2030)	
Panamá							
	Chilibre	53,955	83,877	4.51%	1.55%	1.08%	2.38%
	Ancón	29,761	52,082	5.76%	1.55%	1.08%	2.80%
	Alcalde Díaz	41,292	65,399	4.71%	1.55%	1.08%	2.45%
	Pacora	52,494	75,033	3.64%	1.55%	1.08%	2.09%
	24 de Diciembre	65,404	105,738	4.92%	1.55%	1.08%	2.52%
	Las Cumbres	32,867	51,313	4.56%	1.55%	1.08%	2.40%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Distrito	Corregimiento	Censo 2010	Proyección 2020 Total	Tasa de crecimiento			TCMA
				Corregimiento (2010-2020)	Provincia (2010-2030)	País (2010-2050)	
Arraiján							
	Nuevo Emperador	3,903	5,283	3.07%	1.55%	1.08%	1.90%
	Santa Clara	2,139	2,780	2.66%	1.55%	1.08%	1.76%
	Arraiján	41,041	57,655	3.46%	1.55%	1.08%	2.03%
	Burunga	39,102	53,691	3.22%	1.55%	1.08%	1.95%
Capira							
	El Cacao	4,951	6,017	1.97%	1.55%	1.08%	1.53%
	La Trinidad	2,572	3,149	2.04%	1.55%	1.08%	1.56%
	Santa Rosa	1,767	2,132	1.90%	1.55%	1.08%	1.51%
	Caimito	1,635	2,045	2.26%	1.55%	1.08%	1.63%
	Cirí de los Sotos	2,288	2,779	1.96%	1.55%	1.08%	1.53%
	Cirí Grande	3,635	4,259	1.60%	1.55%	1.08%	1.41%
La Chorrera							
	Arosemena	426	554	2.66%	1.55%	1.08%	1.77%
	Amador	2,996	3,501	1.57%	1.55%	1.08%	1.40%
	Iturralde	1,354	1,721	2.43%	1.55%	1.08%	1.69%
	La Represa	681	821	1.89%	1.55%	1.08%	1.51%
	Mendoza	1,233	1,508	2.03%	1.55%	1.08%	1.56%
	El Arado	2,715	3,395	2.26%	1.55%	1.08%	1.63%
	Hurtado	1,206	1,516	2.31%	1.55%	1.08%	1.65%
	Herrera	2,552	4,112	4.89%	1.55%	1.08%	2.51%
	Obaldía	549	661	1.87%	1.55%	1.08%	1.50%
Colón							
	Buena Vista	14,285	17,265	1.91%	1.50%	1.08%	1.50%
	Cirícito	2,900	3,597	2.18%	1.50%	1.08%	1.59%
	Cristóbal	49,422	62,033	2.30%	1.50%	1.08%	1.63%
	Escobal	2,388	2,868	1.85%	1.50%	1.08%	1.48%
	Limón	4,665	5,604	1.85%	1.50%	1.08%	1.48%
	Nueva Providencia	5,813	8,171	3.46%	1.50%	1.08%	2.02%
	Salamanca	3,881	4,925	2.41%	1.50%	1.08%	1.66%
	San Juan	17,430	21,844	2.28%	1.50%	1.08%	1.62%
	Santa Rosa	987	1,261	2.48%	1.50%	1.08%	1.69%
	Puerto Pilón	16,517	21,298	2.57%	1.50%	1.08%	1.72%
	Sabanitas	19,052	22,814	1.82%	1.50%	1.08%	1.47%
	Cativa	34,558	43,257	2.27%	1.50%	1.08%	1.62%
Chagres							
	La Encantada	2,561	2,815	0.95%	1.50%	1.08%	1.18%

Finalmente, y bajo un escenario tendencial que continúe los patrones de crecimiento establecidos por el INEC, se estima que:

- para el año 2025 la CHCP posee una población de 264,876 habitantes de los cuales el 61% estará concentrado en las regiones del corredor transístico.
- para el año 2030 la población aumenta en 28,897 personas, con un total de 293,773 habitantes.
- posteriormente para el año 2040 la CHCP poseerá una población de 361,802 habitantes, por lo que en 20 años la población actual de la Cuenca (2020) aumentará en un 51%.
- el último horizonte temporal se establece en el año 2070, donde la Cuenca prácticamente triplicara su población actual, con un total de 682,148 habitantes. Las regiones de mayor crecimiento son las del Corredor Transístico Chilibre-Chilibrillo-Colón, seguido del Lago Miraflores, Lago Gatún y Alto Chagres y Alhajuela.

Tabla 39. Proyección de población de la CHCP por región (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070)

Regiones	Censo 2010	Proyecciones				
		Pob. 2020	Pob. 2025	Pob. 2030	Pob. 2040	Pob. 2070
Alto Chagres y Alhajuela	8,664	12,230	13,548	15,014	18,461	34,659
Baila Mono, Cañito, Paja, Pescado	6,815	8,928	9,757	10,664	12,738	21,730
Cirí Grande, Trinidad, Cirícito	11,066	13,407	14,460	15,595	18,141	28,560
Lago Gatún	29,534	41,862	46,413	51,480	63,407	119,576
Lago Miraflores	7,040	10,127	11,253	12,508	15,467	29,458
Los Hules-Tinajones y Caño Quebrado	4,719	6,082	6,639	7,250	8,660	14,945
Corredor Transístico Chilibre - Chilibrillo	65,443	102,590	115,569	130,191	165,225	337,804
Corredor Transístico Colón	35,383	43,693	47,238	51,072	59,702	95,416
Total general	168,664	238,917	264,876	293,773	361,802	682,148

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

No obstante, esta población es una estimación aproximada a la tendencia poblacional que experimenta el ámbito de estudio. En fases posteriores, se definirán los escenarios futuros a los que se orientará la planificación territorial y los elementos susceptibles para un cambio en el crecimiento poblacional.

2.4.1.2.2 Proyección de población de las zonas de atención hídrica

Tal y como se ha explicado anteriormente, el desarrollo de los escenarios territoriales, tendrá en consideración todas las zonas que abastecen sus requerimientos de agua con los recursos hídricos de la CHCP, por lo que se han utilizado las ocho zonas delimitadas en el estudio de Stantec¹², las cuales están conformadas por 87 corregimientos pertenecientes a los distritos Chepo, Panamá y San Miguelito de la provincia de Panamá, los distritos de La Chorrera, Arraiján y Capira de la provincia de Panamá Oeste, y el distrito Colón de la provincia de Colón.

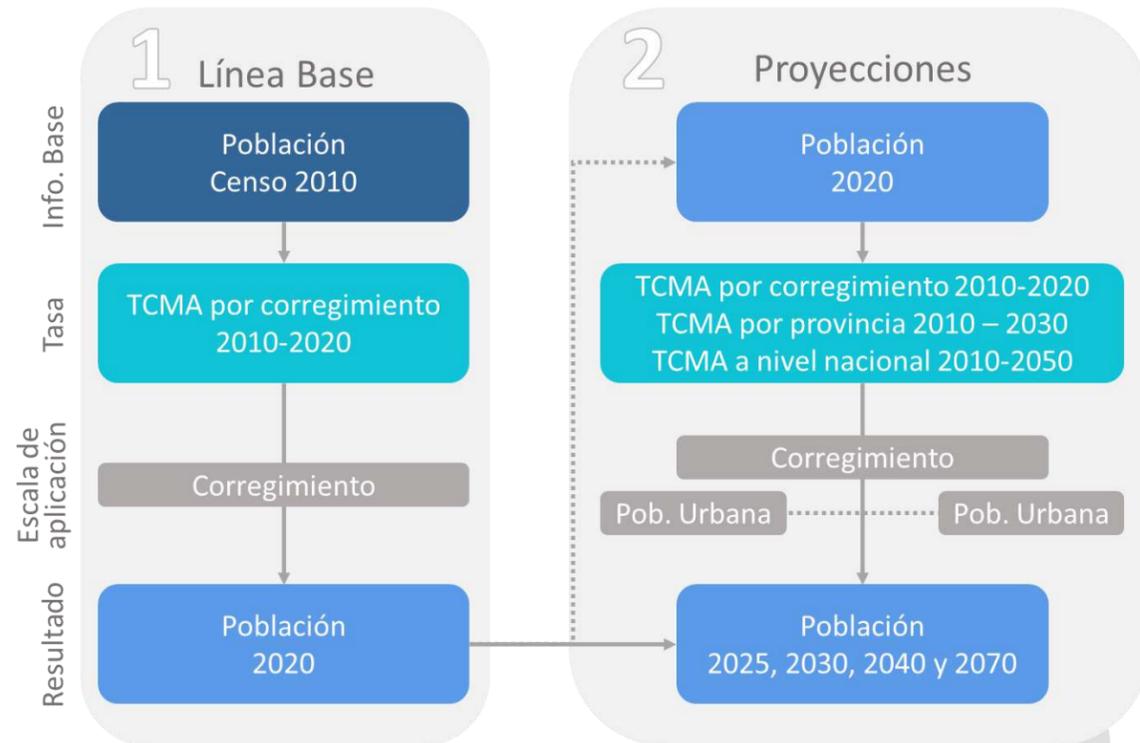
La metodología aplicada para la proyección de población de estas ocho zonas es muy similar a la aplicada para el cálculo de la proyección de población de la CHCP; con las siguientes dos diferencias:

- 1) La TCMA aplicada se refiere directamente al corregimiento, por estar incluido en la totalidad dentro de la zona de requerimiento hídrico, y no es trasladada a cada lugar poblado como se realizó anteriormente.

¹² STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

2) La TCMA podrá variar de acuerdo con el crecimiento de la población rural y urbana. Inicialmente el INEC no diferencia en las proyecciones de población distintas TCMA para cada una; sin embargo, está será una variable de cambio para la construcción de escenarios futuros, respetando la distribución porcentual de cada corregimiento en población urbana y rural según el censo 2010.

Figura 50. Esquema de metodología utilizada para la proyección de las 8 zonas poblacionales



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

En la siguiente tabla se puede observar cuáles son las TCMA tendencial de cada zona, con un promedio de 1.69% de crecimiento, resaltando la Zona 2 al este en el distrito de Chepo y Panamá como la de mayor TCMA con un 2.02%, seguido de la Zona 3 y 4 con un 1.76%.

Tabla 40. Tasa de Crecimiento Media Anual por zona de la CHCP

Zonas	Tasa de crecimiento			TCMA
	Corregimiento (2010-2020)	Provincia (2010-2030)	Pais (2010-2050)	
Zona 1	2.42%	1.54%	1.08%	1.68%
Zona 2	3.41%	1.55%	1.08%	2.02%
Zona 3	2.70%	1.51%	1.08%	1.76%
Zona 4	3.02%	1.55%	1.08%	1.76%
Zona 5	2.25%	1.55%	1.08%	1.63%
Zona 6	2.16%	1.50%	1.08%	1.58%
Zona 7	1.58%	1.55%	1.08%	1.40%
Zona 8	2.86%	1.55%	1.08%	1.37%
Total general	2.44%	1.55%	1.08%	1.69%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

La construcción de la línea base a 2020 señala que en las ocho zonas que demandan agua de la CHCP se encuentran cerca de 2,5 millones de personas, siendo la zona 8 la que concentra el 46% de la población total, seguido de la zona 7 con un 15%, y la zona 4 con un 12%. En conjunto, estas tres zonas, conforman el 74% de la población total de la CHCP y se refieren al núcleo central de la ciudad de Panamá y sus áreas de crecimiento al este y oeste.

Finalmente, y bajo un escenario tendencial que continúe los patrones de crecimiento establecidos por el INEC, es decir, aplicando las TCMA obtenidas anteriormente, sin diferenciar a la población urbana y rural, se estima que para el año 2025, la población demandante crecerá a 2,6 millones de habitantes, lo que representa un 10% adicional en tan solo 5 años. En el año 2030 la población alcanza los 2,9 millones de personas y es para el año 2040 que supera los 3,5 millones de personas, lo que implica 1 millón de habitantes más en 20 años.

Finalmente, en el horizonte temporal de 50 años, es decir para el año 2070, la población de las zonas supera los 6 millones de personas, es decir que la población actual (2020) se multiplica por 2,5 veces. De allí la importancia de generar estudios que permitan planificar los patrones de crecimiento urbano, la ocupación del suelo, los consumos de agua, entre otros, para garantizar la continuidad del recurso hídrico de la CHCP en los años futuros.

Tabla 41. Proyección de población de las 8 zonas poblacionales (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070)

Zonas	Proyecciones				
	Pob. 2020	Pob. 2025	Pob. 2030	Pob. 2040	Pob. 2070
Zona 1	22,077	24,055	26,220	31,188	52,991
Zona 2	41,352	45,643	50,384	61,418	111,573
Zona 3	142,947	158,401	175,587	215,980	405,193
Zona 4	300,979	331,159	364,377	441,188	783,753
Zona 5	233,583	253,109	274,296	322,245	523,921
Zona 6	191,618	207,380	224,442	262,902	422,661
Zona 7	369,732	399,062	431,009	503,868	821,076
Zona 8	1,127,125	1,242,209	1,369,922	1,669,277	3,065,647
Total general	2,429,413	2,661,018	2,916,238	3,508,066	6,186,814

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.4.1.3 Prospectiva económica

Tal y como se concluyó en el diagnóstico integral, las actividades económicas de mayor peso (excluyendo la actividad de la infraestructura del Canal de Panamá) en la Cuenca es el comercio (principalmente en las zonas cercanas al Corredor Transístmico) y las actividades agropecuarias (fundamentalmente en la zona oeste de la CHCP). Además, de estas actividades dentro de la Cuenca, ya se identificó que los grandes elementos tractores de la actividad económica de la Cuenca se encuentran fuera de la misma y son las áreas metropolitanas de las ciudades de Colón y Panamá, cuyas actividades son, básicamente, del sector secundario y terciario.

En cuanto a la actividad comercial, su desarrollo está íntimamente vinculado a la tasa de crecimiento poblacional, por lo que prospectiva se ha relacionado directamente con ella. Así, el crecimiento poblacional se ha asociado con el crecimiento de las áreas pobladas que, en general, no son zonas monofuncionales, sino que aglutinan usos compatibles con el residencial (como pueden ser los usos comerciales, oficinas, equipamientos, etc.). Es este aspecto, en el modelo de escenarios territoriales planteado, el crecimiento o decrecimiento de la población implica un cambio proporcional en la actividad económica del sector terciario en general. Puesto que, como se indicó anteriormente, la tasa de crecimiento de la población del modelo incluye las áreas exteriores a la CHCP (pero que toman el agua de abastecimiento de esta), también en el aspecto de la actividad terciaria se contemplan esas áreas exteriores.

De un modo similar ocurre con el sector secundario, es decir, la industria. Si bien, a diferencia del sector terciario, este uso sí que tiene un carácter más de tipo monofuncional, concentrándose este tipo de actividad en áreas muy definidas.

También hay que añadir que, en este caso, la actividad industrial es un tanto residual en la Cuenca; sin embargo, de modo análogo a lo que ocurre con la actividad terciaria, la mayor parte de la industria se localiza en las áreas metropolitanas de Colón y Panamá y, también, consumiendo el recurso hídrico de la Cuenca. Aunque, como ya se manifestó, la red de agua potable alimenta (de modo general) tanto a la industria como a las áreas pobladas (usos residenciales, comerciales, oficinas, etc.), el comportamiento de la prospectiva industrial no se considera oportuno vincularla a la tasa de crecimiento poblacional. Aunque, existe cierta vinculación entre el desarrollo poblacional y el industrial, los usos industriales están más relacionados con las decisiones de planificación económica que se traduce en la implantación de complejos industriales y, consecuentemente, en la reserva de suelo para estos usos. Por ello, en este caso, y como se verá más adelante, se ha realizado un análisis de la evolución del suelo industrial (tanto en las dos áreas metropolitanas como en el interior de la Cuenca) en los últimos años; esto con el objetivo de determinar una tasa de crecimiento del suelo industrial, que estaría directamente relacionado con la marcha de este sector económico.

Por último, en lo que respecta, a la actividad agropecuaria, hay que señalar que es la que mayor extensión presenta dentro de la CHCP. Además, en este caso, el recurso hídrico se obtiene directamente de la Cuenca, por lo que no existen elementos exteriores que influyan en el análisis. En consecuencia, se ha realizado una vinculación directa entre la tasa de crecimiento del uso de suelo correspondiente (cultivos para la agricultura y pastos para la ganadería) y la actividad agropecuaria; aunque puede existir cierta discrepancia con actividades como las agroindustrias (industrias de transformación directamente ubicadas en el suelo rural), se ha considerado que el error es pequeño dado el pequeño porcentaje que estas agroindustrias representan en el sector.

2.4.1.4 Prospectiva de las infraestructuras

En el manejo de los recursos hídricos de la CHCP la existencia de los embalses Gatún y Alhajuela es fundamental debido a que representan las infraestructuras de almacenamiento del agua captada dentro de la Cuenca. En la actualidad se estima una capacidad máxima de almacenamiento de 6,138 Hm³ y volumen útil de 1,167 Hm³ para el embalse Gatún, mientras que para el embalse Alhajuela una capacidad máxima de almacenamiento de 796 Hm³ y volumen útil de 651 Hm³.

Por otro lado, es primordial considerar las plantas potabilizadoras que extraen agua cruda de los embalses de la CHCP debido a que representan las infraestructuras que producen el agua potable para el consumo humano de más de la mitad de la población nacional. A continuación, se muestran estas potabilizadoras y su capacidad de producción.

Tabla 42. Plantas potabilizadoras

Planta	Fuente	Administración	Capacidad de producción (millones de galones diarios)
Federico Guardia Conte	Embalse Alhajuela	IDAAN	250
Miraflores	Embalse Gatún	ACP	48
Monte Esperanza	Embalse Gatún	ACP	34
Laguna Alta	Embalse Gatún	Aguas de Panamá	20
Antonio Yepes De León	Embalse Gatún	IDAAN	15
Mendoza	Embalse Gatún	ACP	40
Escobal	Embalse Gatún	IDAAN	0.1

Fuente: ACP e IDAAN

A pesar de que actualmente se tiene una capacidad de producción de 407.1 MGD de agua potable por parte de las potabilizadoras, para los futuros horizontes será necesario incrementar la capacidad de producción de agua potable ya sea por ampliación de las actuales potabilizadoras o la construcción de nuevas.

En la actualidad se encuentran en construcción dos nuevas plantas potabilizadoras y la expansión de dos existentes que serán administradas por el IDAAN y que servirán para garantizar el suministro de la población del área metropolitana de Panamá. El proyecto que más avances presenta es la construcción de Chilibre 3, el nuevo módulo de la planta Federico Guardia Conte, que generará diariamente 15 millones de galones de agua adicionales. El otro proyecto de ampliación en ejecución es el nuevo módulo de la planta potabilizadora de Sabanitas II, el cual a comienzos del 2020 presentaba un avance físico del 31% y que tendrá una capacidad de entre 30 y 35 MGD.

Por otro lado, se tiene el proyecto de la nueva planta potabilizadora Gamboa que pretende complementar a la planta de Chilibre, apoyando cuando esta última presente algún problema. En su fase inicial la planta Gamboa producirá 60 millones de galones de agua diarios. También se encuentra en ejecución la construcción de la nueva planta potabilizadora Ing. José Guillermo Rodríguez (Howard) la cual pretende producir en su etapa inicial 40 MGD con una capacidad de ampliación de 60 MGD para abastecer principalmente a los habitantes del distrito de Arraiján.

De acuerdo con los resultados obtenidos del escenario tendencial se prevé un déficit hídrico para abastecer las demandas de agua, de los diferentes sectores que usan el agua de la CHCP, para los cuatro horizontes planteados.

Tabla 43. Demandas insatisfechas del escenario tendencial

Horizonte	Volúmenes de demandas insatisfechas (hm ³ /año)
2025	361.9
2030	563.9
2040	836.6
2070	1630.5

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

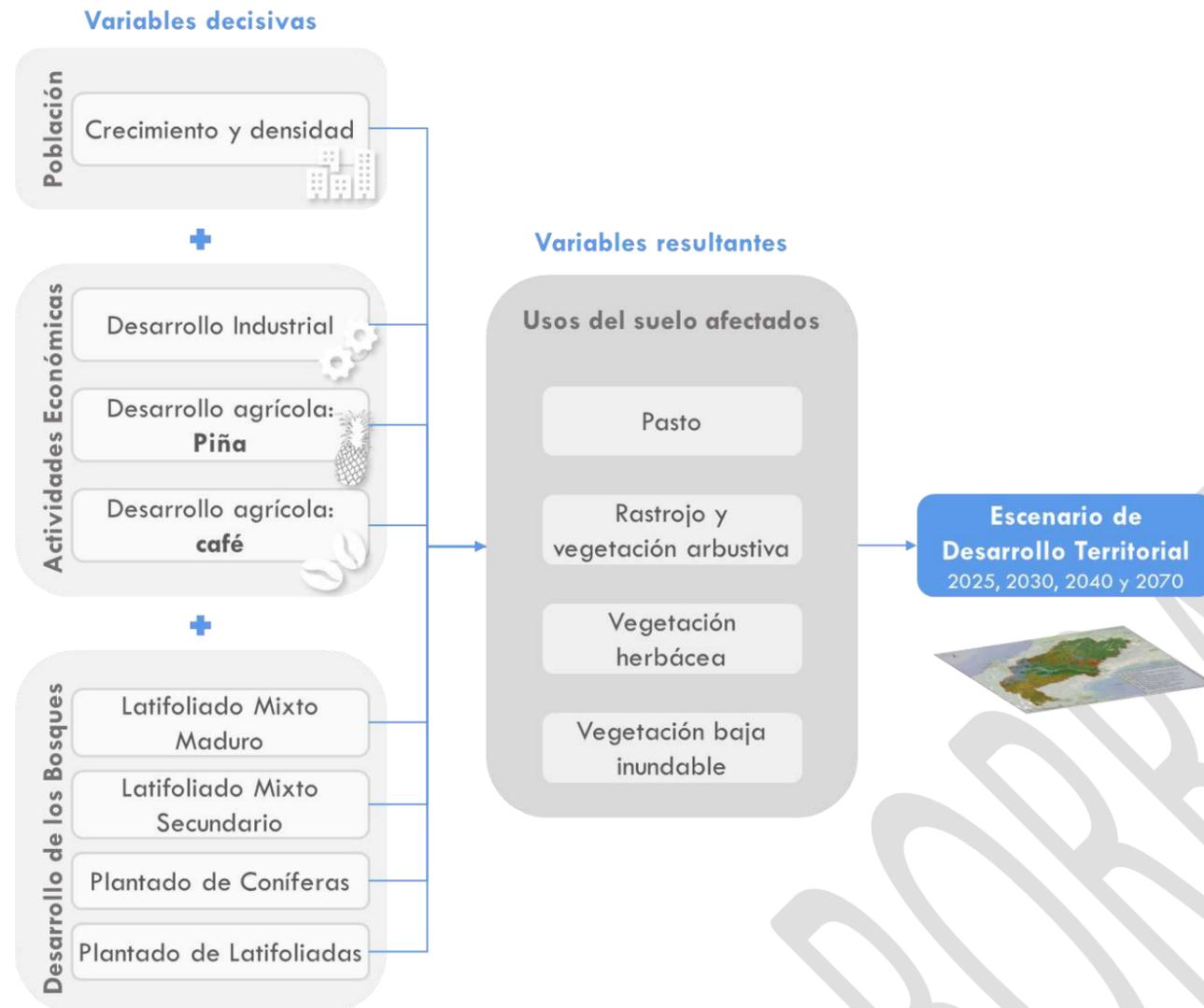
Al margen de que se recomienda buscar hacer más eficiente¹³ el uso del agua de la CHCP, se cree que será necesario la construcción de nueva infraestructura que maximice el almacenamiento del agua dentro de la CHCP y/o añada nuevos recursos hídricos mediante fuentes adicionales de agua.

2.4.1.5 Prospectivas de las variables territoriales

Para la construcción de los escenarios de desarrollo territorial se han definido dos grupos de variables. Las primeras se refieren a cinco variables decisivas, de las cuales se definen las hipótesis de cambio (tasa de crecimiento anual - TCA) que establecerán los nuevos requerimientos de suelo; el desarrollo de estas variables afecta a las del segundo grupo, denominadas variables resultantes, las cuales reflejan los cambios en el tiempo a razón del crecimiento o decrecimiento de las variables decisivas (ver la siguiente figura). Estas variables serán proyectadas a los cuatro horizontes temporales 2025, 2030, 2040 y 2070.

¹³ Mediante reducción de pérdidas, campañas de concienciación de ahorro del agua potable y ahorros en los sistemas de esclusaje

Figura 51. Variables territoriales



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.4.1.5.1 Variables decisivas

Crecimiento poblacional y densidad

Las proyecciones de población se han desarrollado en el anterior apartado 2.4.1.2.2 Proyección de población de las zonas de atención hídrica, donde, a modo de resumen, se definía una Tasa de Crecimiento Medio Anual (TCMA), cuyo análisis tendencial parte del promedio de tres tasas definidas por el INEC según nivel territorial (corregimiento, provincia y país), de la cual resultaba una TCMA de 1.69% para las 8 zonas.

Sin embargo, en la definición de los escenarios de desarrollo territorial, se hace necesario la conversión de esta variable poblacional numérica a un indicador espacial de superficie, por lo que se añade la densidad poblacional, entendida como el número de personas que residen en un área poblada sobre la superficie de dicha área (residencial y no residencial). Así para la CHCP, se obtiene para el año 2020 una densidad de 22 hab/ha.

La combinación de la TCMA de la población y la densidad nos dará, como resultado, la necesidad de superficie para los usos de las áreas pobladas.

Superficie industrial

El análisis del desarrollo y evolución de las zonas industriales representa otro de los factores importantes para el cálculo de la demanda de agua; así como el suelo que ocupará dado su crecimiento en los cuatro horizontes temporales. Para obtener la tasa de crecimiento anual del suelo industrial de la CHCP, se analizó la evolución de las zonas industriales según su localización geográfica:

- Área metropolitana de Panamá: se estudian las previsiones de crecimiento de la huella industrial del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Panamá en el histórico 2017-2030, obteniendo una tasa de crecimiento anual de 2.1%.
- Área metropolitana de Colón: se determina una tasa de crecimiento anual de 4.1%, la mayor de las tres tasas analizadas, producto del análisis del desarrollo de las áreas industriales del POT de Colón en el horizonte temporal 2010-2025.
- CHCP: se analiza la evolución de la superficie ocupada por actividades industriales en la CHCP del año 2004 al 2020, obteniendo una tasa de crecimiento anual de 3.5%. Se utiliza de base el mapa de usos del suelo de la ACP del año 2004 y se realiza una actualización al año 2020, digitalización de áreas urbanas y suelo intervenido con base a imágenes satélites de Google Earth (2020), e información vectorial referente a cultivos y reforestación de la ACP y el PIEA (2020).

Como resultado, en promedio (es decir, considerando las tres áreas geográficas estudiadas) la tasa de crecimiento anual considerada es de 3.24% para el suelo industrial.

Superficie de cultivo (piña y café)

Las tasas de crecimiento anual, de las superficies de los cultivos de piña y café, fueron obtenidas del análisis de la evolución de la superficie que ocupaban en el año 2013 y su actualización al 2020. Específicamente, se utilizó la información de usos del suelo y cobertura vegetal de año 2012 (MiAmbiente) y 2013 (ACP), y se realiza una comparativa con los usos del suelo actualizados al año 2020, con información de tres fuentes básicas tal y como se explicó anteriormente (ACP, PIEA e imágenes satélites de Google Earth).

Después del análisis realizado, las tasas de crecimiento anual determinadas son de 0.15% para el cultivo de piña y 1.96% para el cultivo de café (La mayor tasa de crecimiento de la superficie de café tiene su explicación en el incentivo, que se ha dado a este cultivo, a través del PIEA).

Desarrollo de los Bosques

La cobertura boscosa de la CHCP, se clasifica en cuatro tipos de bosques: latifoliado mixto maduro, latifoliado mixto secundario, plantado de coníferas y plantado de latifoliadas, para los cuales se determinó la tasa de crecimiento anual basada en la comparativa 2004-2020, tal y como se realizó para la superficie industrial y las áreas de cultivo.

Por lo tanto, se calcula una tasa de 0.1% y 0.0% para los bosques latifoliados mixto maduro y secundarios, respectivamente, y de 6.2% para los bosques plantados de coníferas y latifoliadas.

Para los bosques plantados, la evolución de programas de reforestación llevados a cabo en la CHCP, tales como el PIEA. En el caso de los bosques maduros y secundarios, su crecimiento es porcentualmente muy bajo, pero su valor absoluto es grande por la gran superficie que representan en el total de la Cuenca (más del 50% de la superficie total).

2.4.1.5.2 Variables resultantes

Usos del suelo afectados

El desarrollo de las variables decisivas, expuesto anteriormente, repercute en su propia ocupación del suelo (residencial, industrial, cultivos y bosques), pero a su vez modifica la superficie de otros cuatro usos principales:

- Pasto
- Rastrojo y vegetación arbustiva
- Vegetación herbácea
- Vegetación baja inundable

Estos, disminuirán o aumentarán su superficie a razón del crecimiento o decrecimiento de la superficie de las variables decisivas. De manera ilustrativa, si se estima un elevado crecimiento poblacional con una baja densidad, este se traduciría en una mayor ocupación del suelo, que afectará la superficie que ocupan las variables resultantes, entre ellas, la vegetación arbustiva.

2.4.2 Consideración de escenarios en términos de demanda

En este apartado se pretende mostrar las consideraciones para cuantificar las demandas de agua, que son servidas de los recursos hídricos de la CHCP para los diferentes escenarios planteados.

2.4.2.1 Consideraciones del escenario tendencial

Agua potable para consumo humano

En términos del agua para consumo humano, se diferencia a la población por abastecer en tres categorías. Las primeras dos categorías son la población urbana y suburbana, a las cuales se les asocia un consumo medio de 434 y 473 lts/hab./día, respectivamente. La consideración es que estas poblaciones son servidas por los acueductos públicos del IDAAN, y, por ende, el origen de sus aguas son los embalses Gatún y Alhajuela. Por otro lado, la población rural es abastecida por los acueductos rurales que tienen como fuente los cuerpos de agua de las subcuencas donde se localizan los corregimientos rurales. La dotación per cápita de agua potable considerada para la población rural es de 391 lts/hab./día.

Para el escenario tendencial se considera que las pérdidas de los sistemas de distribución de agua potable son de un 35%.

Como se ha visto en los apartados de la prospectiva de los recursos hídricos y prospectiva demográfica, la población por abastecer se localiza en las 8 zonas poblacionales delimitadas en el estudio de Stantec¹⁴. De acuerdo con las proyecciones del INEC, en promedio, estas zonas tienen una tasa de crecimiento medio anual de 1.69 %.

Agua para la operación del Canal (transportación)

De las dos proyecciones de las demandas de agua de las esclusas del Canal de Panamá, que ha determinado la Sección de Meteorología e Hidrología de la ACP, la que se ha considerado para el escenario tendencial es la llamada “con flushing”. Esta proyección, que considera que solo se utilizan las tinas de ahorro de agua en las esclusas Neo Panamax los meses de enero a junio, se asemeja más a las demandas históricas del año 2020.

Agua para uso industrial

La dotación de agua para el uso industrial considerada para el escenario tendencial es la equivalente a un gasto máximo horario de 1 l/s por hectárea¹⁵. Es decir, que cada hectárea de área industrial demandará 31,536 m³/año.

De acuerdo con la información recabada, la gran mayoría de las industrias están conectadas al suministro municipal. Por ello, en la modelización se considerará que las demandas industriales serán abastecidas por las redes de distribución y, por ende, se estimarán las mismas pérdidas (35%) que las consideradas para el consumo humano.

En cuanto a la superficie industrial la tendencia de la tasa de crecimiento anual para el suelo industrial de la CHCP, área metropolitana de Panamá y área metropolitana de Colón es de 3.5%, 2.1% y 4.1%, respectivamente. La tasa de crecimiento anual considerada en el escenario tendencial es de 3.24% para el suelo industrial.

Agua para uso agropecuario

Para el uso agrícola se considera un requerimiento anual neto de agua de 7,700 y 16,945 m³/ha para los cultivos de piña y café, respectivamente. En el escenario tendencial se estima una eficiencia de riego del 65% o, lo que es lo mismo, unas pérdidas del 35%. Lo anterior, se traduce a unas demandas anuales brutas de 11,845 m³/ha para la piña y 26,069 m³/ha para el café.

Las tasas de crecimiento anual de las superficies de los cultivos de piña y café, consideradas en el escenario tendencial, son de 0.15% y 1.96%, respectivamente.

De los valores del hato ganadero, consumo medio de agua del ganado vacuno, consumo de agua asociado a los establos y la superficie de suelo pecuario (pasto) se considera que se demanda anualmente 46.47 m³ por hectárea de pasto.

Variables territoriales del escenario tendencial

A continuación, se muestra el resumen de las tasas de cambio anual de las variables territoriales consideradas para el escenario tendencial de la CHCP:

Tabla 44. Variables territoriales del escenario tendencial

Variable	Tasa de cambio anual
Poblacional urbana	1.69%
Poblacional rural	1.69%
Superficie industrial	3.24%
Superficie cultivo piña (cultivo permanente)	0.15%
Superficie cultivo café (cultivo permanente)	1.96%
Bosque Latifoliado Mixto Maduro	0.1%
Bosque Latifoliado Mixto Secundario	0.0%
Bosque Plantado de Coníferas	6.2%
Bosque Plantado de Latifoliadas	6.2%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

De igual manera, se muestran las demandas de agua y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

¹⁴ STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

¹⁵ Dicha dotación es la recomendada por la Norma Mexicana NMX-R-046-SCFI-2015 para parques industriales

Tabla 45. Demandas de agua del escenario tendencial

Sector	Variables de demanda de agua	Unidades	Valor	Coefficiente de pérdidas
Agua potable para consumo humano	Urbana	lts/hab./día	434	0.35
	Suburbana	lts/hab./día	473	0.35
	Rural	lts/hab./día	391	0.35
Industrial	Industrial	m3/ha/año	31,536	0.35
Agropecuario	Cultivo café	m3/ha/año	16,945	0.35
	Cultivo piña	m3/ha/año	7,700	0.35
	Ganado	m3/ha/año	46	-
Esclusaje ¹⁶	Panamax	Esclusaje diario Panamax equivalente	24.44	-
	Neo Panamax	Esclusaje diario Panamax equivalente	25.73	-

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Como ya se había comentado, en el escenario tendencial, para las demandas del esclusaje se consideran las proyecciones elaboradas por la ACP del escenario “con flushing”. En la tabla anterior, se muestran los resultados de la demanda de agua para el año 2025 de las esclusas de los sistemas Panamax y Neo Panamax.

2.4.2.2 Consideraciones del escenario optimista

Agua potable para consumo humano

En el escenario optimista se espera que la dotación neta de agua per cápita descienda hasta 250 lts/hab./día para la demanda urbana, 200 lts/hab./día para la demanda suburbana y 150 lts/hab./día para la demanda rural. Se cree que para llegar a los anteriores valores se tendrán que realizar campañas de concienciación de ahorro del agua y la regularización de todas las conexiones domésticas.

A su vez, para dicho escenario se plantea reducir hasta un 15% las pérdidas en la distribución del agua potable.

Agua para la operación del Canal (transportación)

De las dos proyecciones de las demandas de agua de las esclusas del Canal de Panamá, que ha determinado la Sección de Meteorología e Hidrología de la ACP, la que se ha considerado para el escenario optimista es la llamada “sin flushing”. Este escenario plantea la utilización de las finas de ahorro de agua, en las esclusas Agua Clara y Cocolí, todo el año.

Agua para uso industrial

La dotación de agua para el uso industrial considerada para el escenario optimista es equivalente al 90% utilizada en el escenario tendencial. Es decir, se plantea reducir hasta una demanda anual de 28,382 m³ por cada hectárea de suelo industrial.

Por su parte, también se plantea una mejora en los sistemas de distribución al reducir las pérdidas a un 15%.

En cuanto a la superficie industrial en este escenario se espera que la tasa de crecimiento anual sea de 2.50%. Es decir, inferior a la supuesta de 3.24% del escenario tendencial.

Agua para uso agropecuario

Para el uso agrícola se considera un requerimiento anual neto de agua de 7,700 y 16,945 m³/ha para los cultivos de piña y café, respectivamente. En el escenario optimista se estima una eficiencia de riego del 75% o, lo que es lo mismo, unas pérdidas del 25%.

Respecto a las superficies de los cultivos de piña y café se considera, para el escenario optimista, que se limite su crecimiento hasta la superficie que actualmente cubre en la CHCP.

Para el uso del agua del sector pecuario se considera la misma demanda por hectárea de pasto utilizada para el escenario tendencial.

Variables territoriales del escenario optimista

Tabla 46. Variables territoriales del escenario optimista

Variable	Tasa de cambio anual
Poblacional urbana	1.80%
Poblacional rural	1.70%
Superficie industrial	2.50%
Superficie cultivo piña (cultivo permanente)	0.00%
Superficie cultivo café (cultivo permanente)	0.00%
Bosque Latifoliado Mixto Maduro	1.00%
Bosque Latifoliado Mixto Secundario	1.00%
Bosque Plantado de Coníferas	5.00%
Bosque Plantado de Latifoliadas	5.50%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

De igual manera, se muestran las demandas de agua y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

¹⁶ Es importante comentar que un esclusaje Panamax equivalente utiliza un volumen de 55 millones de galones de agua y que la HIAM supone que para el año 2034 no aumentará más la demanda de las esclusas.

Tabla 47. Demandas de agua del escenario optimista

Sector	VARIABLES de demanda de agua	Unidades	Valor	Coefficiente de pérdidas
Agua potable para consumo humano	Urbana	lts/hab./día	250	0.15
	Suburbana	lts/hab./día	200	0.15
	Rural	lts/hab./día	150	0.15
Industrial	Industrial	m3/ha/año	28,382	0.15
Agropecuario	Cultivo café	m3/ha/año	16,945	0.25
	Cultivo piña	m3/ha/año	7,700	0.25
	Ganado	m3/ha/año	46	-
Esclusaje ¹⁷	Panamax	Esclusaje diario Panamax equivalente	24.44	-
	Neo Panamax	Esclusaje diario Panamax equivalente	19.17	-

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Como ya se había comentado, en el escenario optimista, para las demandas del esclusaje se consideran las proyecciones elaboradas por la ACP del escenario “sin flushing”. En la tabla anterior, se muestran los resultados de la demanda de agua para el año 2025 de las esclusas de los sistemas Panamax y Neo Panamax.

2.4.3 Validación de los escenarios a modelar

Como se ha mencionado en el apartado de prospectiva, las consideraciones del escenario tendencial en cuanto a las variables que afectan a la demanda de agua se realizaron de acuerdo con datos propios del territorio y los diferentes sectores que hacen uso del agua de la CHCP.

Recapitulando, para la determinación del agua potable para consumo humano se consideraron las zonas poblacionales y dotaciones per cápita del estudio de Stantec¹⁸. Este parte de datos proporcionados por el IDAAN y la ACP. Mientras que el número de los habitantes a servir se determinaron con base en las proyecciones del INEC.

En términos del agua para la operación del Canal, se ha considerado la proyección del escenario “con flushing” debido a que es el que más se asemeja a las demandas observadas del año 2020.

En cuanto al uso industrial, primero se determinaron las tasas de crecimiento anual de las áreas industriales que son abastecidas de agua proveniente de la CHCP: *área metropolitana de Panamá* a través de las previsiones de crecimiento de la huella industrial del POT de Panamá; *área metropolitana de Colón* producto del análisis del desarrollo de las áreas industriales del POT de Colón; y la propia CHCP mediante la evolución de la superficie ocupada por actividades industriales del año 2004 al 2020. Mientras que la dotación de agua para el uso industrial se consideró de 1 l/s por hectárea¹⁹.

Por su parte, las demandas agropecuarias fueron determinadas con base en los consumos y requerimientos propuestos en el *Reporte de determinación del balance hídrico y caudal ambiental de la Cuenca del Río Indio*²⁰ (contigua a la CHCP) con los datos de superficie de los cultivos (Piña, Café y Pasto) y hato ganadero propios de la CHCP.

¹⁷ Es importante comentar que un esclusaje Panamax equivalente utiliza un volumen de 55 millones de galones de agua y que la HIAM supone que para el año 2034 no aumentará más la demanda de las esclusas.

En el taller “Escenarios del modelo de balance hídrico de la CHCP” llevado a cabo el día 8 de abril de 2021 por el equipo redactor del PIOTA se dio una presentación de las variables territoriales/poblacionales y demandas consideradas en el escenario tendencial.

Para este propósito, se mostraron: las tasas de cambio anuales y las superficies cubiertas de cada una de las diferentes categorías de uso de suelo de la Cuenca. Así como también, la tasa de cambio anual de la población urbana y rural. Mientras que, para las proyecciones de las demandas de agua, se indicaron las demandas y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

En dicho taller participaron miembros de diversas organizaciones como: algunas instituciones de la Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CICH); actores del territorio como los Comités Locales; la academia; alcaldías; el Consejo Nacional del Agua (CONAGUA), etc.

A continuación, se destacan las principales aportaciones de los participantes al taller:

- Se ha visto un gran incremento de la población ubicada en las zonas urbanas y suburbanas en el área de influencia de la Cuenca, por lo que consideran un mayor crecimiento anual de la población, que el estimado por las proyecciones del INEC.
- La superficie de suelo industrial crecerá a razón de cerca de 4.86% anualmente. Es decir, que los asistentes al taller consideran que la superficie industrial crecerá más que la proyección tendencial (3.24%).
- La superficie del cultivo de piña incrementará más del 0.15% de la Tasa de Cambio Anual considerada en el escenario tendencial.
- Es necesario reducir las pérdidas en la distribución del agua potable. Se debería plantear un objetivo de reducir a un 10 o 15% las pérdidas (actualmente se consideran unas pérdidas del 35%).
- Las demandas per cápita de agua para consumo humano son muy altas, así como el agua no contabilizada. Se aconseja regularizar el consumo y reducir las dotaciones netas a un ideal de 150 o 200 lts/hab./día.
- A mediano y largo plazo será necesario incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos para cubrir todas las demandas. La desalinización para el uso de las esclusas puede llegar a ser una opción viable en el futuro.
- Será fundamental conocer e implementar los proyectos, que actualmente se tienen en licitación externa solicitados por la Oficina de Proyectos Hídricos de la ACP, que buscan cubrir las demandas de agua para consumo humano y las operaciones del Canal. Los anteriores, contemplan maximizar el almacenaje de agua dentro de la CHCP y fuentes adicionales de agua.

Con base en las aportaciones recibidas de los asistentes al taller se ha procedido primeramente a construir el escenario optimista y queda pendiente el escenario consensuado que contendrá gran parte de lo comentado por los participantes del taller.

A continuación, se hablará de las consideraciones del escenario optimista.

Referente al agua potable para consumo humano se espera que la dotación neta de agua per cápita descienda hasta 250 lts/hab./día para la demanda urbana, 200 lts/hab./día para la demanda suburbana y 150 lts/hab./día para la demanda rural. Lo anterior, conforme a la necesidad de reducir el agua no contabilizada y las dotaciones netas (comentado por los asistentes al taller). A su vez, se plantea el objetivo de reducir hasta un 15% las pérdidas en la distribución de agua potable.

¹⁸ STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

¹⁹ Dicha dotación es la recomendada por la Norma Mexicana NMX-R-046-SCFI-2015 para parques industriales

²⁰ Este reporte forma parte del “Estudio para la elaboración del diseño conceptual del reservorio multipropósito en la Cuenca de Río Indio y proyectos complementarios para el manejo de la cuenca” celebrado entre el Ministerio de Ambiente y la Autoridad del Canal de Panamá

En términos del agua para la operación del Canal, se ha considerado la proyección del escenario “*sin flushing*” debido a que es el que considera un mayor ahorro de agua debido al uso durante todo el año de las tinajas de ahorro en las esclusas Agua Clara y Cocolí.

La dotación de agua para el uso industrial considerada para el escenario optimista es equivalente al 90% utilizada en el escenario tendencial. Es decir, se plantea reducir hasta una demanda anual de 28,382 m³ por cada hectárea de suelo industrial. Por su parte, también se plantea una mejora en los sistemas de distribución al reducir las pérdidas a un 15%.

En cuanto a la superficie industrial en este escenario se espera que la tasa de crecimiento anual sea de 2.50%. Es decir, inferior a la supuesta de 3.24% del escenario tendencial.

Para el uso agrícola se considera el mismo requerimiento anual neto de agua. Sin embargo, se plantea una reducción en las pérdidas a un valor del 25%. Respecto a las superficies de los cultivos de piña y café se considera que no crecerán más, limitándose hasta la superficie que actualmente ocupan en la CHCP.

2.4.4 Modelo territorial futuro

Capítulo pendiente de desarrollar el modelo consensado.

BORRADOR

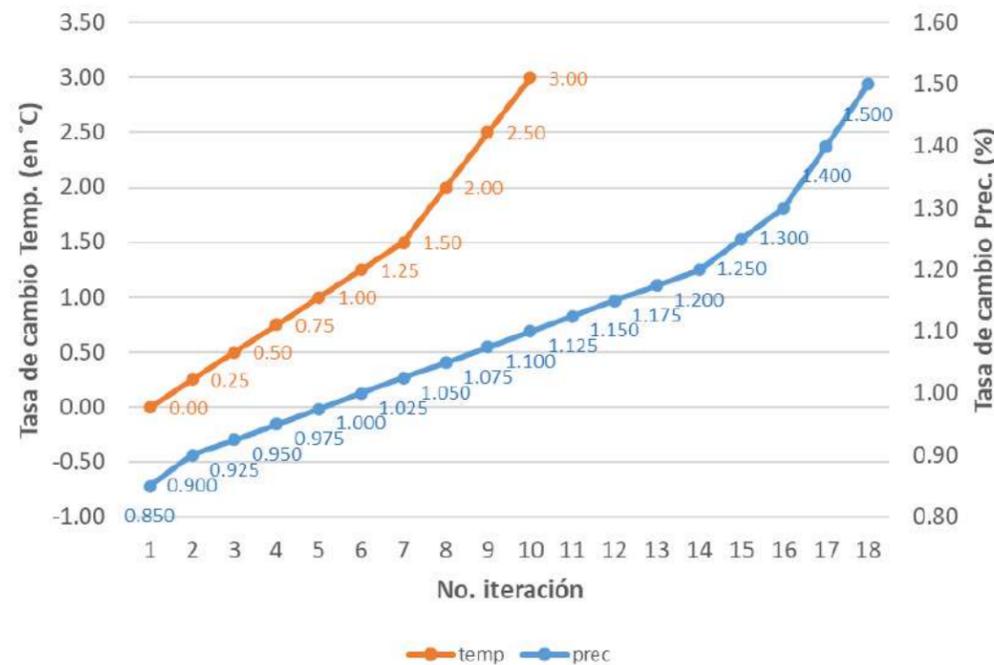
2.5 Análisis de balance hídrico y robustez climática

2.5.1 Descripción escenarios a simular

Como se ha descrito en la sección 2.1.3.1 Aspectos generales del modelo WEAP-CHCP se ha analizado la condición de línea de base, más tres escenarios de desarrollo territorial adicionales (tendencial, ambicioso y consensuado). A su vez cada escenario se ha proyectado a cuatro horizontes temporales (2025, 2030, 2040 y 2070) que se han parametrizado convenientemente.

Para cada escenario y proyección climática, el modelo WEAP-CHCP se ha ejecutado para el continuo de variación climática (cambio porcentual de precipitación, y absoluto de temperatura) predicho por los modelos regionales de cambio climático. El rango plausible de variación de la precipitación anual va entre una reducción del 15% y un aumento del 50%, mientras que la temperatura se predice podrá variar entre 0 y 3 °C. Para la generación de las Superficies de Respuesta Climática para cada uno de los horizontes temporales contemplados por escenario territorial, se ha generado un continuo de variación de cambios de precipitación-temperatura consistente en 198 posibles combinaciones (Figura 52).

Figura 52. Rango de variación de cambios multiplicativos de precipitación y aditivos de temperatura simulados en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.5.1.1 Parametrización de la condición de línea de base en modelo WEAP-CHCP

En la sección 2.1.3.1 se introdujeron los principales elementos de demanda que constituyen el modelo WEAP-CHCP. A través de las siguientes tablas, se presenta la parametrización adoptada para representar la condición de línea de base, desgregado en cada uno de los nodos de demanda representados en el modelo. La parametrización de los escenarios territoriales, con y sin medidas de adaptación, se han descrito en la sección 2.4 Escenarios de desarrollo territorial.

Demanda Urbana

Tabla 48. Parametrización de la demanda urbana para la condición de línea de base.

Subsistema (WEAP ID)	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de demanda (unid.)	Dotación (m3/unid./año)	Pérdidas (%)	Capacidad potab./distr. (hm3/día)
Gatún (PUI.GAT)	Población Urbana-Suburbana (PU.GAT)	Z3	122,986	172.8	Total pérdidas en producción: 10%	0.60
		Z4	292,916	172.8		
		Z5	194,411	172.8		
		Z6	191,618	160.0		
		TOTAL PU.GAT (hab.)	801,931			
Industrial (I.GAT)	Industrial (I.GAT)	Ciudad Colón	1,450	31,536	Total pérdidas en distribución: 20%	
		Cuenca_GAT	383	31,536		
		TOTAL I.GAT (ha)	1,833			
Alhajuela (PUI.MAD)	Población Urbana-Suburbana	Z7	369,732	160.5	Total pérdidas demanda urbana: 35%	0.95
		Z8	1,127,125	172.8		
		TOTAL PU.MAD (hab.)	1,496,857			
	Industrial	Ciudad_Panamá	282	31,536		
		Cuenca_MAD	161	31,536		
	TOTAL I.MAD (ha)	444				

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Demanda Poblacional Rural

Tabla 49. Parametrización de la demanda rural para la condición de línea de base.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de demanda (unid.)	Dotación (m3/hab./año)	Pérdidas (%)
Gatún (PR.GAT)	Población Rural	GatS	30,801	142.7	Total pérdidas en producción: 10%
		GatN	19,961		
		Trini	11,211		
		Ciri	9,170		
		TOTAL PR.GAT (hab.)	71,143		
Alhajuela (PR.MAD)	Población Rural	Subcuenca Chagres	6,939	142.7	Total pérdidas demanda rural: 35%
		TOTAL PR.MAD (hab.)	6,939		

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Demanda Agropecuaria

Tabla 50. Parametrización de la demanda agropecuaria para la condición de línea de base.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de demanda (ha)	Dotación (m3/ha/año)	Pérdidas
Gatún (A.GAT)	Agrícola	CAFE	1486	16,945	35%
		PIÑA	3345	7,700	
	Pecuario		67,677*	46.5	
Alhajuela (A.MAD)	Agrícola	CAFE	42	16,945	
		PIÑA	0	7,700	
		Pecuario	7,287 ²¹	46.5	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Demanda de Esclusaje

Tabla 51. Parametrización de la demanda agropecuaria para la condición de línea de base.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de esclusaje equivalente (unid./año)	Dotación (hm3/unid./año)
Gatún (T.GAT)	Esclusaje	Panamax	8,688	0.2082
		NeoPanamax	7,342	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

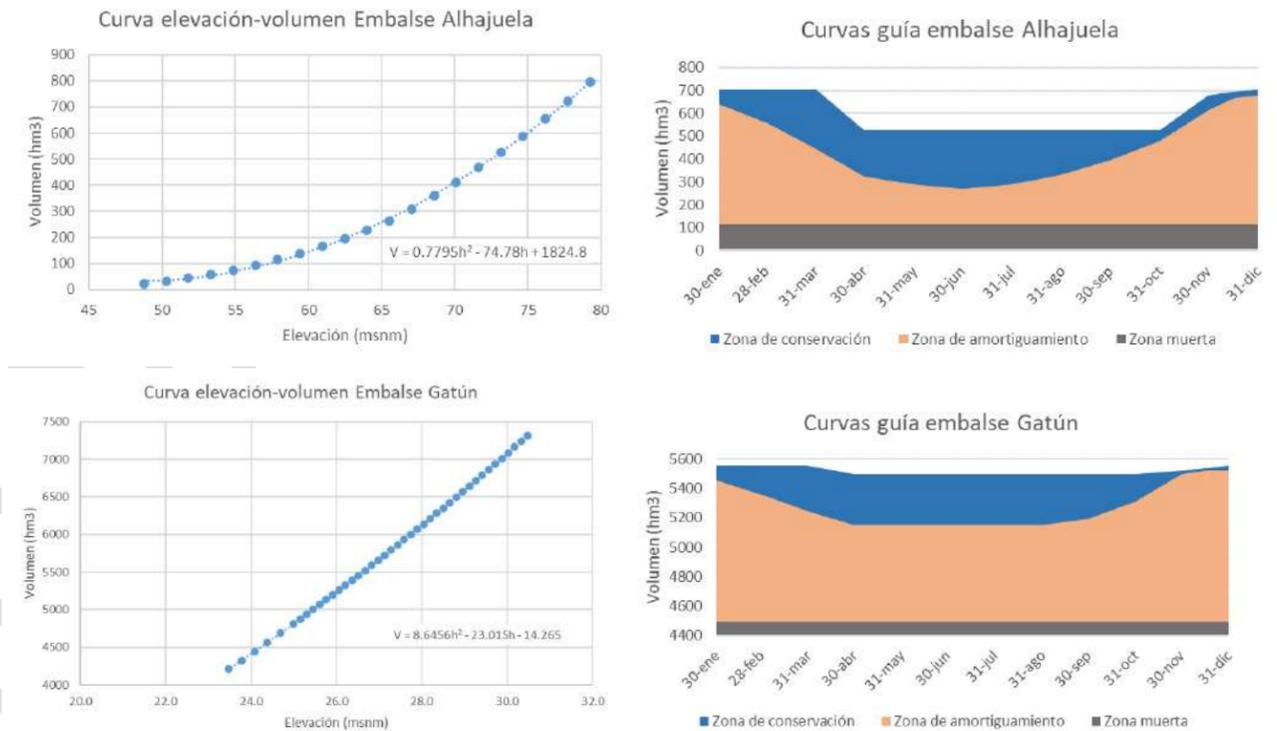
Los parámetros adoptados para los embalses se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 52. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.

Parámetro	Embalse Alhajuela	Embalse Gatún
Capacidad de almacenamiento (hm3)	795.95	6,138.72
Almacenamiento al inicio del periodo de simulación (hm3)	600	5450
Curva de elevación-volumen	Tabla 7	Tabla 7
Máximo efluente hidráulico (m3/s)	6242	7268
Pérdidas de fondo o laterales (m3/s)	0.980	3.795
Nivel superior de conservación (hm3)	Tabla 7	Tabla 7
Nivel superior de amortiguamiento (hm3)	Tabla 7	Tabla 7
Volumen muerto (hm3)	114.8	4288.8
Coefficiente de amortiguamiento (%)	0.15	0.20
Máximo caudal de turbinado (m3/s)	108.5	150.4
Nivel de turbinado (m)	25	60
Prioridad de llenado (adimensional)	50	40

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 53. Curvas elevación-volumen (izqda.) y guía (dcha.) para los embalses de Alhajuela (panel superior) y Gatún (panel inferior)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

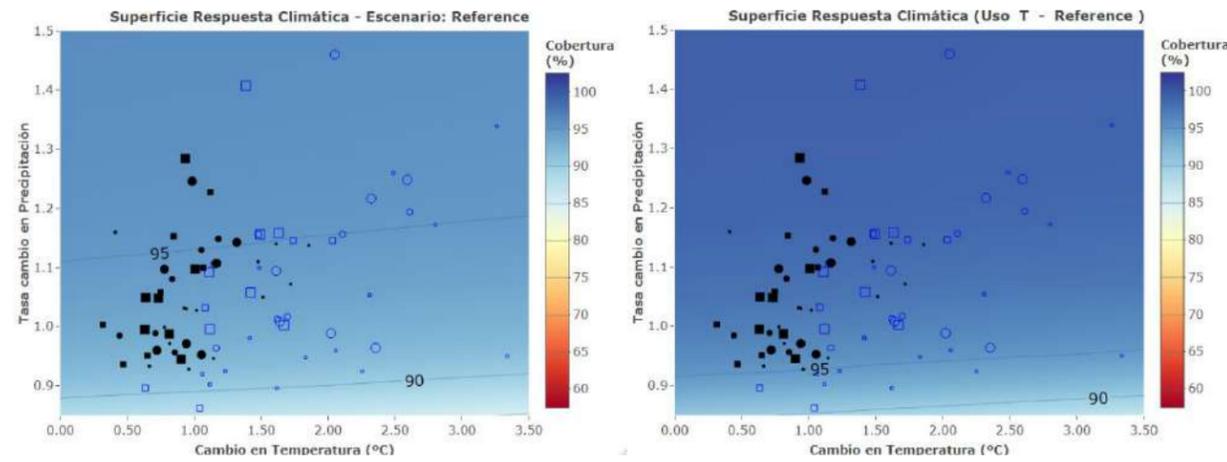
2.5.2 Resultados para condiciones de línea base

De acuerdo con los resultados obtenidos, el valor total de agua requerida para cubrir todas las demandas de la Cuenca, incluyendo las pérdidas que no retornan al sistema, asciende a 4093 hm³/año, siendo la demanda no satisfecha de 254 hm³/año en términos promedio y la cobertura promedio anual del 94% de cobertura. En la Figura 54 se presentan las Superficies de Respuesta Climática obtenidas para el indicador de cobertura anual promedio en el periodo de simulación 1989-2018 para la condición de línea de base y en el supuesto que el actual patrón de desarrollo se mantuviese hasta el horizonte 2070.

Como se puede comprobar, los valores de cobertura para la cuenca y la demanda de esclusaje estarían prácticamente al 100% siempre por encima del 90% y, por tanto, la Cuenca presentaría un elevado nivel de seguridad hídrica a escala del sistema global. La robustez climática para la condición de línea de base para el conjunto de sistema sería del 98% para umbral de garantía del 90% de cobertura, y de un 99% para un umbral del 85%

²¹ En superficie equivalente de pasto (ha)

Figura 54. SRC para la condición de línea de base calculada para la cobertura anual promedio de la Cuenca (panel izquierdo), y la cobertura para la demanda de esclusaje (panel dcho.)



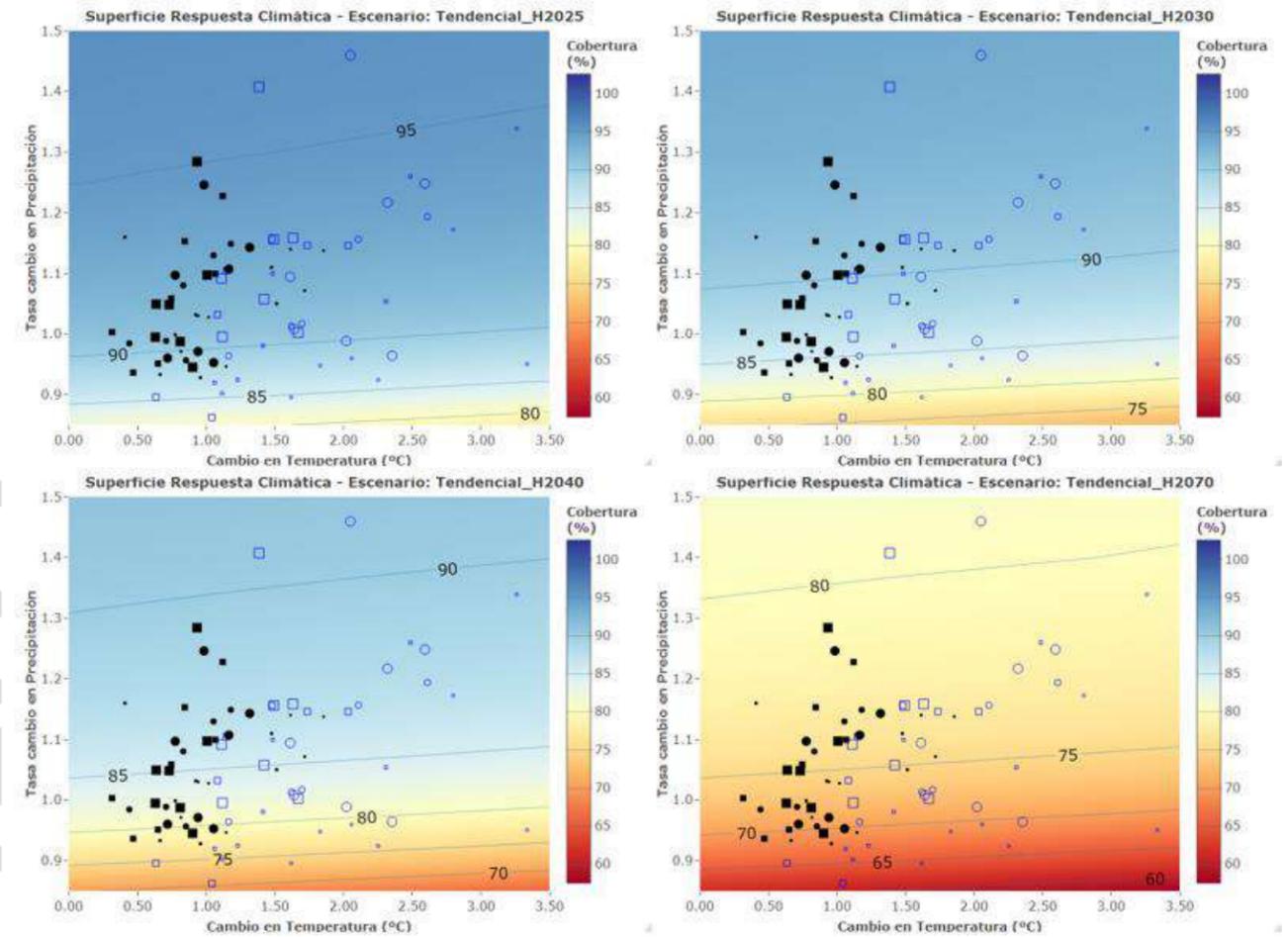
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.5.3 Resultados del escenario tendencial

Se analizó el escenario tendencial, mediante la aproximación metodológica anteriormente expuesta. En la Figura 55 se muestran las Superficies de Respuesta Climática para el indicador de cobertura anual promedio simulado para cada uno de los cuatro horizontes temporales proyectados para el escenario tendencial (2025, 2030, 2040 y 2070). Los aumentos generalizados de las demandas hacen que los valores de cobertura estén por debajo de los simulados para la condición de línea de base.

De acuerdo con las SRC y el análisis de robustez climática, el comportamiento de del sistema para satisfacer la demanda de agua marcado por el escenario tendencial sería robusto hasta el horizonte 2030. A partir de entonces la robustez climática para un cubrir el mínimo del 85% de la demanda quedaría fuertemente comprometida, con valores de robustez inferiores al 50%, debido en gran parte a la escasez de recursos y la falta de infraestructuras de potabilización y abastecimiento que deberían acompañar a los aumentos de población y superficie industrial. Al no depender de limitaciones físicas, las cotas de seguridad hídrica para el esclusaje aún se mantendrían altas y moderadamente altas hasta el horizonte 2040 (Tabla 53).

Figura 55. Superficie de Respuesta Climática del escenario tendencial sobre los cuatro horizontes analizados (2025, 2030, 2040 y 2070)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 53. Robustez climática calculada en función de las superficies de la respuesta para cada horizonte

Escenario de desarrollo	Robustez climática (umbral cobertura 85%)	
	Sistema	Esclusaje
Referencia	99%	100%
Tendencial (H2025)	96%	98%
Tendencial (H2030)	74%	93%
Tendencial (H2040)	47%	74%
Tendencial (H2070)	2%	66%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.5.4 Resultado de los escenarios de posible intervención territorial

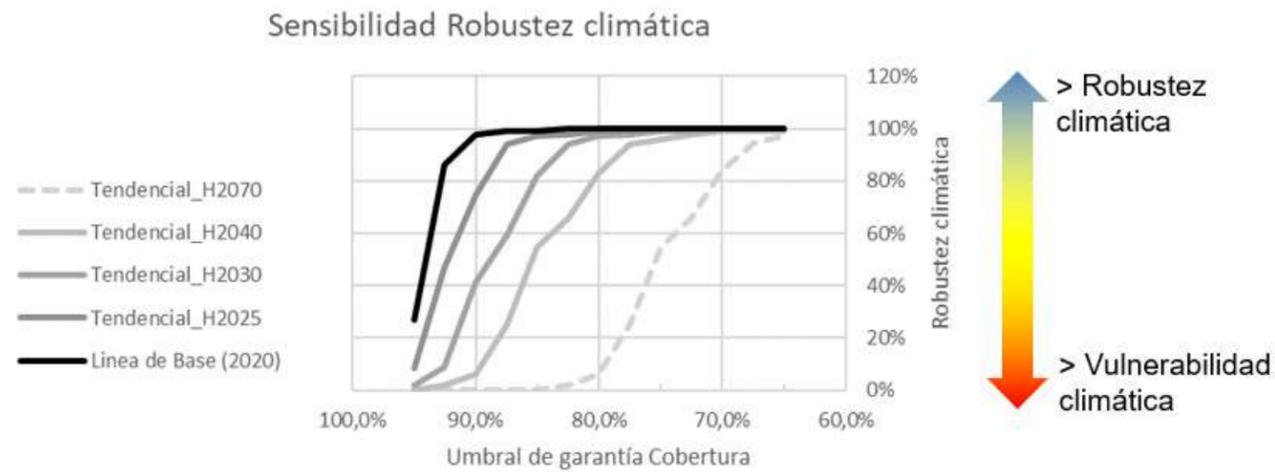
Se actualiza en informe final.

2.5.5 Análisis de sensibilidad

Capítulo en desarrollo - se muestra lo relativo al escenario tendencial

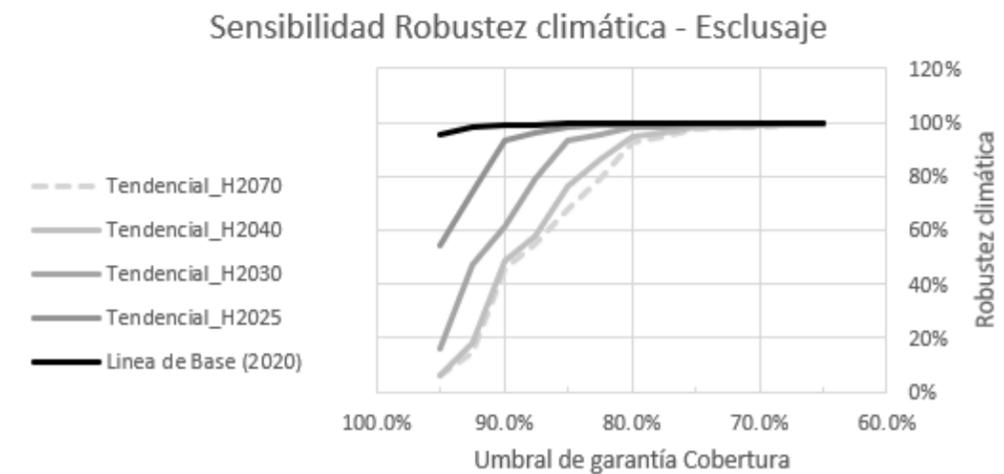
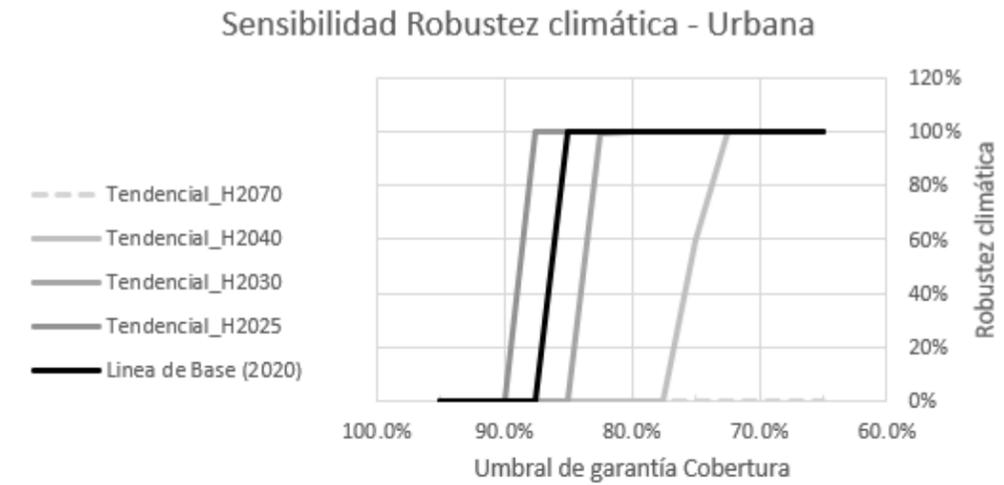
El valor de robustez climática para un indicador de desempeño es muy sensible al criterio y umbral de garantía que se establezca. La robustez del sistema se reduce conforme aumenta el nivel de seguridad exigido para cubrir las demandas de un sistema hidrológico (Figura 56). Por ejemplo, para el horizonte 2070 del escenario tendencial y considerando que un 60% de robustez climática es una cifra razonable, el nivel de garantía exigido para la cobertura promedio anual en la cuenca tendría que rebajarse hasta aproximadamente un 70%.

Figura 56. Valores de robustez climática para diferentes umbrales de garantía fijados para la cobertura promedio anual.



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 57. Curva de robustez climática según nivel de garantía en la satisfacción de la demanda para la demanda urbana y de esclusaje



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.6 Rutas de adaptación

2.6.1 Diseño y formulación

Capítulo pendiente de desarrollo, a la espera de los resultados de la modelización del balance hídrico bajo los diferentes escenarios de desarrollo ter

2.6.2 Identificación de acciones de no arrepentimiento

Capítulo pendiente de desarrollo

2.6.3 Co-beneficios y sinergias

Capítulo pendiente de desarrollo

2.6.4 Vulnerabilidades residuales

Capítulo pendiente de desarrollo

BORRADOR

Anexo 1. Nodos de demanda en modelo WEAP-CHCP

Subsistema	Nodo de demanda	ID_WEAP	Subnivel 1	Subnivel 2	Unidades de demanda 2020	Dotación (m3/unidad de demanda)	% pérdidas	Prioridad	Características
Alhajuela	Urbano (poblacional urbano + industrial)	PUI.MAD	PU.MAD	Z7					Toma de agua en embalse. Pérdidas no retornadas al sistema.
				Z8					
		I.MAD	Cuenca_MAD						
			Ciudad_Panama						
	Rural	PR.MAD	Chag						Toma única de agua en río. Pérdidas retornadas al sistema.
	Agrícola	A.MAD	CAFÉ PIÑA						
Gatún	Urbano (Poblacional Urbano + Industrial)	PUI.GAT	PU.GAT	Z3					Toma de agua en embalse. Pérdidas no retornadas al sistema.
				Z4					
				Z5					
			I.GAT	Cuenca_GAT					
				Ciudad_Colón					
	Rural	PR.GAT	GatS GatN Trini						Toma única de agua en río. Pérdidas retornadas al sistema.
	Agrícola	A.GAT	Ciri CAFÉ PIÑA						



Bibliografía

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

ANAM (2011). Atlas Ambiental de la República de Panamá 2010. ANAM-BID. Panamá: Autoridad Nacional del Ambiente.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.

Amato, C. C., McKinney, D. C., Ingol-Blanco, E., & Teasley, R. L. (2006). WEAP hydrology model applied: the Rio Conchos Basin. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500.

Escobar, M., and Sandoval, G.L. (2014). Modelación del recurso hídrico en la cuenca del río La Vieja en Colombia. USAID and SEI fact sheet.

BORRADOR