

## Estudios de caso de adaptación al cambio climático

### Efectos del cambio climático en períodos de sequía en la ciudad de Trujillo en Perú



Véanse [aquí](#) las normas sobre referencias para certificaciones del DHI. Suprima lo que no se conforma al sistema de referencias. Este texto debe suprimirse antes de finalizarse el documento.

Este documento fue preparado conforme al Sistema de Gestión Gerencial del DHI y cuenta con la certificación de DNV en las siguientes áreas		
Gestión de calidad	Gestión ambiental	Salud ocupacional y gestión de riesgos
ISO 9001	ISO 14001	OHSAS 18001
Incorpore en los casilleros los logotipos correspondientes a las certificaciones admisibles. Los logotipos se indican <a href="#">aquí</a> .		

En caso de no requerirse firma electrónica el espacio para la firma puede suprimirse. De ser necesario, pueden incorporarse nuevos espacios para firmar (véanse las instrucciones [aquí](#)). Este texto debe suprimirse antes de finalizarse el documento.

Aprobado por
Firma de Claus Skotner

## Estudios de caso de adaptación al cambio climático

### Efectos del cambio climático en períodos de sequía en la ciudad de Trujillo en Perú

Preparado por el Banco Interamericano de Desarrollo  
Representación a cargo de Fernando Miralles-Wilhelm y Raúl Muñoz Castillo



Número de proyecto	11809666
Clasificación	Distribución limitada

Autores	Roar Askær Jensen
	Anita May Asadullah
	Alejandro Ernesto Lasarte

## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>
1.1	Antecedentes
1.2	El estudio de caso
1.3	Enfoque usado en este estudio de caso
<b>2</b>	<b>Resumen, conclusiones y recomendaciones</b>
2.1	Análisis de vulnerabilidad
2.2	Pronóstico de cambio climático
2.2.1	Pronóstico de cambio climático en la Cuenca del Río Moche
2.2.2	Pronóstico de cambio climático en la Cuenca del Río Santa
2.3	Efectos del cambio climático en el uso de agua y en las aguas subterráneas
2.3.1	Efectos en el acuífero del Río Moche
2.3.2	Efectos en la disponibilidad de agua para el Proyecto Chavimochic
2.3.3	Efectos en el área de riego
2.4	Plan esquemático de adaptación
2.4.1	Medidas generales de adaptación
2.4.2	Adaptación a un clima más seco
2.4.3	Adaptación a un clima más húmedo
2.5	Enseñanzas adquiridas en este estudio de caso
<b>3</b>	<b>Análisis de la susceptibilidad y vulnerabilidad del sistema</b>
3.1	Aspectos generales
3.2	¿Podría ser vulnerable al cambio climático el suministro de agua de Trujillo?
<b>4</b>	<b>Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua y las condiciones del agua subterránea</b>
4.1	Cambios climáticos previstos en Trujillo y la Cuenca del Río Moche
4.1.1	Cambios en la precipitación
4.1.2	Cambios en la temperatura
4.1.3	Efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche y en la recarga del acuífero
4.1.3.1	Enfoque
4.1.3.2	Efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche
4.1.3.3	Efectos del cambio climático en el acuífero del Río Moche
4.1.3.4	El nivel actual de extracción de agua subterránea en escenarios futuros de clima
4.1.3.5	El bombeo en escenarios de clima futuros
4.2	Pronóstico del cambio climático en la Cuenca del Río Santa
4.2.1	Cambios estimados en la precipitación
4.2.2	Cambios estimados en la temperatura
4.2.3	Cambios previstos en la disponibilidad de agua para el Canal Chavimochic
4.2.3.1	Efectos en el caudal del río inducidos por el clima
4.2.4	Otros factores que afectan el caudal del río
<b>5</b>	<b>Efectos del cambio climático en la demanda de agua para riego en la zona de Trujillo</b>

<b>6</b>	<b>El proceso de adaptación</b>
6.1	Posibles medidas de adaptación
6.2	Matriz de preselección
<b>7</b>	<b>Plan esquemático de adaptación</b>
7.1	Medidas generales de adaptación
7.2	Adaptación a un clima más seco
<b>8</b>	<b>Referencias</b>

## Gráficos

Gráfico 1. Ubicación geográfica de la Cuenca del Río Moche y la Cuenca del Río Santa  
 Gráfico 1.2 Enfoque gradual usado en los estudios de caso en el marco de este proyecto

Gráfico 1.2 Previsto cambio en la precipitación (como porcentaje de los valores actuales) hasta 2030 en Perú. Fuente: Segunda Comunicación Nacional (Referencia 2)

Gráfico 4.2 Previsto cambio en la temperatura máxima diaria hasta 2030 en Perú. Fuente: Segunda Comunicación Nacional (Referencia 2)

Gráfico 1.3 Previsto cambio en la temperatura mínima diaria hasta 2030 en Perú. Fuente: Segunda Comunicación Nacional (Referencia 2)

Gráfico 1.3. Ubicación geográfica de las estaciones hidrológicas usadas en el modelo de escorrentía de lluvia en la Cuenca alta del Río Moche

Gráfico 1.4. Calibración del modelo NAM para la zona de captación (cuenca) del Río Moche. Correntía mensual media simulada y observada en Quirihuac

Gráfico 1.5 El 75% de los caudales mensuales seguros simulados en el Río Moche (Cuirihuac), en las condiciones actuales y en escenarios optimistas y pesimistas del clima en el futuro

Gráfico 1.6 El 75% de las contribuciones seguras del agua subterránea al Río Moche aguas arriba de Cuirihuac, en las condiciones actuales y en escenarios optimistas y pesimistas del clima en el futuro

Gráfico 1.7. Cobertura del modelo Chavimochic del acuífero del Valle de Moche

Gráfico 1.8. Incremento simulado del agua subterránea desde los niveles actuales a los niveles existentes en un escenario de clima seco. Los valores negativos indican una reducción de la capa freática

Gráfico 1.9 Incremento simulado del agua subterránea desde los niveles actuales a los niveles existentes en un escenario de clima húmedo. Los valores negativos indican una reducción de la capa freática

Gráfico 1.10 Zonas de agregación: todo el acuífero (rojo) y secciones donde la distancia simulada entre el agua y la superficie es inferior a cinco metros en el escenario (café)

Gráfico 1.11 Incremento programado del bombeo en el acuífero para satisfacer la creciente demanda (SEDALIB 2005) (Referencia 9)

- Gráfico 4.13 Cambios en la profundidad del agua subterránea (distancia desde la superficie) en un clima futuro húmedo, con respecto a las condiciones actuales, si el volumen de bombeo en los pozos de SEDALIB es de 1.500 l/s
- Gráfico 4.14 Cambios en la profundidad del agua subterránea (distancia desde la superficie) en un clima futuro seco, con respecto a las condiciones actuales, si el volumen de bombeo en los pozos de SEDALIB es de 1.500 l/s
- Gráfico 1.12. Importancia relativa de los factores que contribuyen a crear incertidumbre en las proyecciones a 10 años de la temperatura promedio en América del Sur. **Naranja**: variabilidad natural interna de la temperatura; **azul**: incertidumbre del modelo; **verde**: incertidumbre del escenario. La selección del modelo climático es el principal factor en el caso del horizonte de 2030-2039. Fuente: Referencia 13
- Gráfico 1.13. Importancia relativa de los factores que contribuyen a crear incertidumbre en las proyecciones sobre precipitación en junio, julio y agosto en América del Sur. **Naranja**: variabilidad natural interna de la precipitación; **azul**: incertidumbre del modelo; **verde**: incertidumbre del escenario. Las proyecciones son más susceptibles a ser afectadas por la selección del modelo climático que por la selección del escenario de emisiones. Fuente: Referencia 14
- Gráfico 4.14 Cambios en la lluvia caída sobre la Cuenca del Río Santa durante el período de 2030-2039 según los modelos MRI y NCAR. (Fuente: Referencia 1)
- Gráfico 4.15 Temperaturas previstas en la Cuenca del Río Santa para el período de 2030-2039, comparado con el período de referencia, mediante dos modelos climáticos (MRI y NCAR) en el escenario A1B de emisiones. Fuente: Ref 1
- Gráfico 5.16 Cambios en la evaporación de referencia en Trujillo, calculados modificando el componente de temperatura en las estimaciones de Penman-Monteith y manteniendo los otros parámetros al nivel actual
- Gráfico 6.17 La Guía de adaptación (Adaptation Wizard) del UKCIP y UKCIP 2.0., Oxford (UKCIP, 2008)

## Cuadros

- Cuadro 4.1 Escenarios simulados de cambio climático
- Cuadro 1.2 Aumentos simulados de los niveles de agua subterránea en el acuífero del Moche (niveles actuales de bombeo) en el futuro. Las variaciones se indican como “máximo”, “mínimo” y “promedio” en el acuífero como un todo y en la sección del acuífero donde la distancia simulada entre el agua subterránea y la superficie es inferior a cinco metros. Las dos áreas de agregación se indican en el gráfico 4.11
- Cuadro 4.3 Aumentos simulados del nivel de agua subterránea en el acuífero del Valle de Moche, de las condiciones actuales de bombeo y clima a un futuro escenario de clima seco con un volumen de bombeo de 1500 l/s . Las variaciones se indican como “máximo”, “mínimo” y “promedio” en el acuífero como un todo y en la sección del acuífero donde la distancia simulada entre el agua subterránea y la superficie es inferior a cinco metros. Las dos áreas de agregación se indican en el gráfico 4.11
- Cuadro 4.4 Cambios previstos en la lluvia caída en la Cuenca del Río Santa, según dos modelos climáticos diferentes en el marco de un escenario A1B de emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: Referencia 1

Cuadro 4.5 Cambios en la temperatura pronosticados para la Cuenca del Río Santa en dos modelos climáticos. Fuente: Referencia 1

Cuadro 4.6 Cambios previstos en el caudal del Río Santa en Condorcerro, río arriba de la toma del Canal Chavimochic. Fuente: Referencia 1

Cuadro 4.7 Superficie glaciada prevista en un modelo de los glaciares usando las proyecciones de los dos modelos climáticos. Véase la Referencia 1

Cuadro 4.8 Estimaciones y proyecciones de población en Perú y la región de Ancash. (Referencia 12)

Cuadro 5.1 Factores del cambio calculados en la evaporación de referencia y la demanda futura de agua para riego, en base a los cambios de temperatura previstos

## **Apéndices**

**A Simulación con modelos de la escorrentía y el cambio climático en la Cuenca alta del Río Moche**

**B Efectos del cambio climático en el acuífero del Río Moche**

**C Adaptación al cambio climático en el sector de riego. Componentes propuestos del programa**

## 1 Introducción

### 1.1 Antecedentes

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) contrató a DHI para que realice este estudio en el marco de un proyecto denominado “Productos de conocimiento y fortalecimiento de la capacidad” (Knowledge and Capacity Building Product).

Este proyecto tiene como objetivo global la creación de una primera carpeta de estudios de casos de adaptación que permita al BID asistir a los países miembros que establecen políticas específicas de adaptación al cambio climático en lo que respecta a sus efectos en los recursos hídricos.

Los estudios de casos están basados en actividades en curso del BID en la región de América Latina y el Caribe (LAC) y tienen por finalidad proveer información y análisis de áreas específicas para ayudar a los administradores de recursos hídricos a abordar los problemas creados por el cambio climático. Los estudios tienen como objetivo también establecer directrices para integrar el tema de la adaptación al cambio climático en la implementación de proyectos financiados por el BID y reconocer explícitamente los efectos de las medidas de adaptación.

El estudio de caso descrito en el presente informe forma parte de este proyecto y guarda relación con los ***efectos del cambio climático en períodos de sequía en la ciudad de Trujillo en Perú.***

Los objetivos específicos del estudio de caso son los siguientes:

- i. Contribuir a fortalecer la capacidad de SEDALIB, la empresa de agua y saneamiento de Trujillo, y de las autoridades de la ciudad para adaptarse al cambio climático.
- ii. Determinar –desde el punto de vista de las variables cuantitativas calculables– las vulnerabilidades del sector de agua y saneamiento de LAC frente al cambio climático en lo que respecta a distintos tipos de proyectos.
- iii. Contribuir a crear directrices para la adopción de “prácticas óptimas” de adaptación al cambio climático en el sector de agua y saneamiento en LAC.
- iv. Facilitar todos los aspectos de la labor de clasificación, seguimiento y evaluación que el BID hace de sus inversiones orientadas a reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático en la región.

Además de Trujillo, se seleccionaron las siguientes tres ciudades como casos para describir los distintos efectos del cambio climático:

1. Montevideo en Uruguay (incremento de fenómenos hidrológicos extremos).
2. Puerto España en Trinidad y Tabago (aumento del nivel del mar).
3. Quito en Ecuador (hidrología de montaña/derretimiento de glaciares).

En los últimos años, el BID, en su calidad de socio estratégico de la ciudad de Trujillo y SEDALIB, ha elaborado varios proyectos básicos de inversión en infraestructura para agua y saneamiento en esa ciudad. Actualmente, la División de Agua y Saneamiento del BID, al amparo de la cual se realiza este proyecto, colabora con Trujillo en el marco del proyecto global “Ciudades Sostenibles” a fin de aumentar la sostenibilidad de la ciudad, incluido el mejoramiento de la capacidad institucional para lograr una gestión eficiente.

## 1.2 El estudio de caso

La Ciudad de Trujillo está situada a la orilla del Río Moche (véase el gráfico 1) y su abastecimiento de agua proviene de dos fuentes distintas:

1. El acuífero situado en el Valle de Moche.
2. El agua transportada a través del Canal Chavimochic. Mediante este canal se distribuye agua desde el Río Santa (de caudal perenne) a lo largo de la costa. El agua se usa principalmente para el riego de cultivos comerciales. En la actualidad, el suministro de agua para Trujillo a través del canal (1,25 m<sup>3</sup>/s) tiene la mayor prioridad (mayor que el riego) y solo ocupa una pequeña parte de la capacidad del canal.

Por consiguiente, al evaluar la vulnerabilidad de Trujillo frente al cambio climático probablemente deberán evaluarse también los efectos de esos cambios en ambas fuentes de agua y las consecuencias en el suministro de la ciudad. Ambas fuentes presentan grandes diferencias desde el punto de vista hidrológico y del clima.

El Río Moche se alimenta desde una cuenca de 2.700 km<sup>2</sup> situada, predominantemente, en la región árida o semiárida del país (véase el gráfico 1), donde no existen glaciares. El caudal varía considerablemente durante el año y en ciertos períodos de la estación seca es bastante bajo (inferior a 1 m<sup>3</sup>/s). Los únicos estudios del cambio climático disponibles para la cuenca del Río Moche son estudios nacionales basados en modelos de circulación global con poca resolución. Además, se han hecho pocos estudios hidrológicos del río y la información existente es escasa. En el estudio de caso se analizaron los posibles cambios del nivel del acuífero del Río del Valle Moche en base a la información disponible.

La Cuenca del Río Santa tiene una superficie total de alrededor de 12.200 km<sup>2</sup>. De los ríos que desembocan en el Océano Pacífico, el Santa es el segundo más importante de Perú y el de caudal más regular (véase el gráfico 1). El río tiene su origen en los glaciares de la Cordillera Blanca, situada en la zona oriental de la cuenca. La Cordillera Blanca contiene la mayor concentración mundial de glaciares tropicales, la mayoría de los cuales fluyen hacia el oeste, es decir, hacia el Océano Pacífico a través del Río Santa. El Río Santa ha sido más estudiado que el Moshe. Se han constituido modelos regionales para hacer proyecciones de escala reducida del cambio climático y existen evaluaciones del efecto del cambio climático en el caudal del río y de los glaciares. Estos estudios se han usado para cuantificar los posibles efectos del cambio climático en la ciudad de Trujillo. La distribución de los recursos hídricos en el Río Santa tiene aspectos de política que son delicados y, dada la competencia por usar estos recursos, sobre todo en la estación seca, en la evaluación del futuro suministro de agua en Trujillo podrían

haberse tomado en cuenta otros factores además de los puramente climáticos.

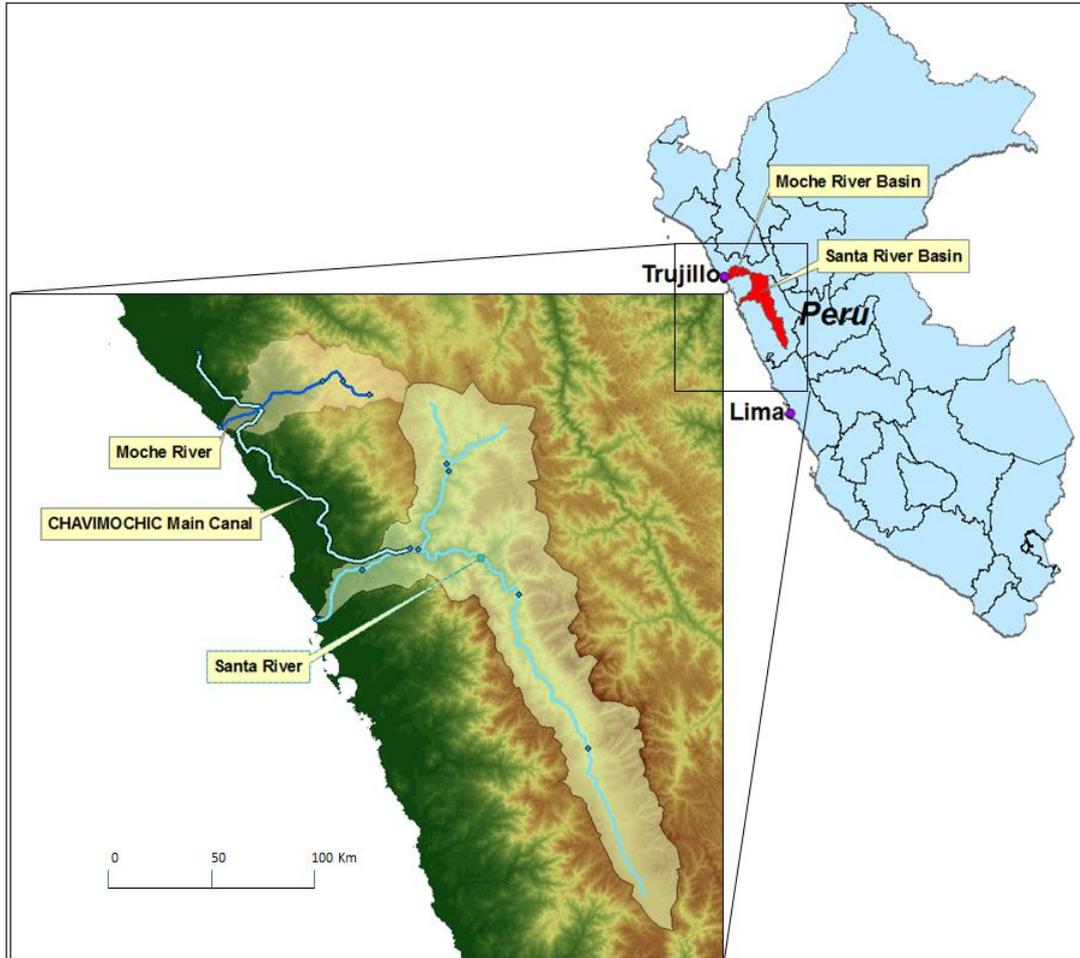


Gráfico 18. Ubicación geográfica de la Cuenca del Río Moche y la Cuenca del Río Santa.

Además de suministrar agua en Trujillo, el Proyecto Chavimochic provee agua para riego en la costa y en el Valle Moche. En el pasado, los agricultores de la zona extraían agua del acuífero del Valle Moche, aunque en la actualidad muchos de ellos usan el agua de superficie del Canal Chavimochic. En vista de las pérdidas que produce el riego, este cambio de las fuentes se traduce en una importación neta de agua al acuífero, lo que en los últimos años ha aumentado el nivel de las aguas subterráneas en Trujillo, causando problemas en las fundaciones de edificios y caminos y una congestión de los drenajes río abajo en el valle. Por tanto, en Trujillo los problemas con el recurso hídrico parecen estar más relacionados con la congestión de drenajes que con la sequía.

Puesto que SEDALIB sigue bombeando aguas sin tratar aguas arriba en el acuífero del Río Moche, y se quiere aumentar el bombeo, este estudio de caso incluye un análisis de sostenibilidad de ese bombeo en el marco del cambio climático.

En base a la evaluación de los efectos del cambio climático en el caudal del Canal Chavimochic y el acuífero del Río Moche, se han especificado y categorizado de manera preliminar posibles medidas de adaptación a fin de crear un esquema inicial de adaptación orientado al futuro inmediato. Las conclusiones iniciales sobre opciones de adaptación serán presentadas y examinadas con las partes interesadas en Trujillo, tras lo cual se preparará un informe revisado del estudio de caso.

### 1.3 **Enfoque usado en este estudio de caso**

El enfoque usado en el estudio de caso es un enfoque gradual orientado a incorporar la capacidad de adaptación y resistencia al cambio climático en los proyectos de desarrollo, de acuerdo al sistema elaborado por USAID. No obstante, el enfoque se ha modificado a fin de ajustarlo a las necesidades del proyecto, tanto en cuanto a alcance como a foco de atención. En los casos en que el enfoque original parece centrarse principalmente en proyectos nuevos de infraestructura, se considera la sostenibilidad de los actuales sistemas de suministro de agua y drenaje de Trujillo y su adaptación a las futuras condiciones climáticas. Este enfoque se explica en el gráfico 1.2.

#### **1. Análisis de susceptibilidad y vulnerabilidad**

¿Es aparente que el sistema es susceptible a variar y vulnerable frente al cambio climático?

De no ser así, terminar aquí.

#### **2. Cuantificar los posibles efectos climáticos en el sistema**

¿Cuáles son los efectos en cuanto a disponibilidad de recursos hídricos, nivel del mar e inundaciones y sequías?

#### **3. Evaluar la susceptibilidad a variar del sistema frente a los efectos en el agua**

**Comparar los efectos en las existencias reguladoras del sistema con los efectos creados por otros factores**

#### **4. Determinar posibles medidas de adaptación**

¿Son viables estas opciones en el futuro?

Efectos adversos

Nuevos estudios para reducir la incertidumbre en el análisis

Proponer un plan de adaptación

Gráfico 1.19 Enfoque gradual usado en los estudios de caso en el marco de este proyecto

## 2 Resumen, conclusiones y recomendaciones

### 2.1 Análisis de vulnerabilidad

Es improbable que el cambio climático tenga efectos en el suministro de agua del Río Santa para Trujillo a través del Canal Chavimochic. El suministro anual para Trujillo es equivalente a solo el 4% del suministro para riego a través del canal, y el suministro para la ciudad tiene prioridad. Además, el Canal Chavimochic fue concebido para servir un área mayor que la cubierta en la actualidad. Por lo tanto, en caso de ser necesario el Proyecto Chavimochic deberá contar con existencias reguladoras, incluso para aumentar el suministro de agua para la ciudad.

En parte, el suministro depende del bombeo en el acuífero del Río Moche, y ese bombeo podría ser afectado por la sequía. Por consiguiente, los efectos en el acuífero del propuesto bombeo en futuros casos de sequía o humedad se han analizado con un modelo de aguas subterráneas.

Trujillo podría ser indirectamente vulnerable frente al cambio climático debido a los posibles efectos climáticos en el riego, que es la base de la sostenibilidad económica de la ciudad. Por lo tanto, los efectos del cambio climático en el caudal del Río Santa, evaluados mediante otros estudios (Referencia 1), se han examinado y usado para analizar el impacto en el caudal del Canal Chavimochic.

También se ha hecho una evaluación de las posibles variaciones de la demanda de agua para riego en un clima seco, y se ha incluido en el análisis a fin de estudiar la vulnerabilidad del sector de riego frente a los cambios climáticos previstos.

El análisis indica que Trujillo está expuesta a una congestión de drenajes en el posible caso de un clima más húmedo, aunque en el caso de un clima más seco la ciudad podría sufrir una escasez de agua después de 2020. Sin embargo, el análisis parece indicar también que existen medidas de adaptación en ambos casos.

### 2.2 Pronóstico de cambio climático

El agua suministrada a la Ciudad de Trujillo tiene su origen en dos fuentes: la zona de captación del Río Moche y el Río Santa (a través del Canal Chavimochic). Las predicciones del cambio climático para estas dos áreas se abordan en forma separada.

#### 2.2.1 Pronóstico de cambio climático en la Cuenca del Río Moche

El mejor análisis del cambio climático disponible para la Cuenca del Río Moche es el efectuada en el marco de la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (Referencia 2). El análisis está basado en marcos hipotéticos (“escenarios”) mundiales del clima creados con metodologías dinámicas y estadísticas para obtener resultados a escala reducida. Estas metodologías son reconocidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (el IPCC, en inglés) para su uso en escenarios de alto nivel de emisiones (A2).

En base a esta evaluación nacional, en el presente estudio de caso se prepararon los siguientes casos hipotéticos o “escenarios” del clima en la región:

- Un escenario de clima seco, si la temperatura aumenta 1,2 ° C y la precipitación *se reduce* en un 10% en la Cuenca del Río Moche.
- Un escenario de clima húmedo, si la temperatura aumenta 0,4 ° C y la precipitación *aumenta* en un 10% en la Cuenca del Río Moche.
- Un escenario de cambio climático en las zonas costeras en el cual la temperatura aumenta 0,8 ° C y no se producen cambios en el nivel de precipitación, que en esas zonas desérticas es insignificante.

## 2.2.2 Pronóstico de cambio climático en la Cuenca del Río Santa

Las proyecciones del cambio climático en la Cuenca del Río Santa y sus efectos en la disponibilidad de agua fueron hechas y notificadas por MINAM y SENAMHI en 2012 (Referencia 1). Este informe es el estudio más actualizado de la zona y sirve de base para la información presentada en este documento. En el informe se evalúan los cambios durante el horizonte de 2030-2039.

Las proyecciones del cambio climático para la Cuenca del Santa se simularon para el escenario A1B de emisiones de gases de efecto invernadero. El escenario A1B está basado en supuestos de rápido crecimiento económico y bajo aumento de la población, con una acelerada incorporación de nuevas y más eficientes tecnologías.

Se analizan los resultados de dos modelos climáticos: el modelo japonés MRI, que ofrece una alta resolución espacial (20km<sup>2</sup>), y el modelo NCAR, en que se utiliza una reducción dinámica de escala del modelo climático global CCSM3 y tiene una resolución de 5km<sup>2</sup>.

En ambos modelos se proyecta un incremento de la precipitación durante los meses más húmedos y una pequeña reducción durante los meses más secos de julio y agosto para el período de 2030-2039. No obstante, el modelo NCAR también proyecta una reducción de la precipitación en enero y febrero. En el modelo NCAR el proyectado aumento de la precipitación anual es del 3,2% y en el modelo MRI del 16,1%.

En ambos modelos se observa un aumento de la temperatura en la Cuenca del Santa todos los meses del año. *Los aumentos de temperatura oscilan entre 0.9 y 1.7 ° C* en ambos modelos.

## 2.3 Efectos del cambio climático en el uso de agua y en las aguas subterráneas

### 2.3.1 Efectos en el acuífero del Río Moche

En base a los análisis de la escorrentía de lluvia en la Cuenca alta del Río Moche, que se efectuaron en el marco de este estudio de caso, se ha determinado que el 75% de la escorrentía mensual probable en Quirihuac, situado aguas arriba del acuífero, varía en factores de 1,37 en el escenario de clima húmedo y 0,57 en el

escenario de clima seco. Los factores correlativos para el 75% del caudal básico probable (contribución del agua subterránea) son de 1,41 en el escenario de clima húmedo y de 0,55 en el de clima seco.

En un estudio anterior se propuso un posible incremento del bombeo en los pozos del sistema de Chavimochic (Chavimochic, Referencia 6) para hacer frente a la congestión de drenajes. *Se hizo un análisis de este bombeo combinado con los niveles actuales de extracción por parte de SEDALIB para fines de suministro interno en el marco de un escenario de clima seco, y se determinó que los niveles actuales de bombeo son viables.* En el escenario de clima seco, dado que el nivel de entrada de aguas subterráneas en el acuífero es menor y que el río tiene menos agua, los niveles de agua subterránea serán más bajos. En general, los resultados indican una reducción media de 0,9 metros en las secciones del acuífero en que actualmente la profundidad del agua subterránea es inferior a cinco metros.

En un escenario de clima húmedo, con bombeo de agua, el nivel de aguas subterráneas se eleva en todas las secciones del acuífero debido al aumento del caudal del río y del nivel de aguas subterráneas. Se ha calculado que, en promedio, el aumento del nivel de aguas sería de 0,32 metros en el área en cuestión, donde el agua subterránea está situada a menos de cinco metros de la superficie. *Sin embargo, se ha determinado que un incremento del bombeo para consumo doméstico a 1500 l/s, como lo propuso SEDALIB en el plan básico de 2005 (Referencia 9), es suficiente para controlar el aumento del nivel de agua e incluso permitiría reducir en 0,64 metros, en promedio, el nivel de aguas subterráneas en ciertas secciones importantes de la ciudad. Este escenario futuro de bombeo parece ser sostenible en condiciones de clima húmedo.*

El posible aumento de la extracción para consumo doméstico a 1500 l/s se ha analizado también en el contexto de un escenario de clima seco. En este caso los resultados indican una reducción considerable del nivel de agua subterránea de alrededor de 4,5 metros en los sectores más importantes de la ciudad. Si bien en este escenario *el bombeo parece ser sostenible*, las aguas subterráneas a lo largo de la costa se reducen a un nivel cercano a cero. Por tanto, *para evitar un posible problema de salinidad en el acuífero esta opción debe investigarse con mayor detalle y, en caso de implementarse, deberá traer aparejado un seguimiento intensivo de los niveles de agua subterránea en la zona costera.*

En consecuencia, *el análisis realizado al amparo de este estudio usando el modelo actual de aguas subterráneas parece indicar que el propuesto aumento del bombeo para satisfacer la demanda interna hasta 2018 es sostenible en ambos escenarios climáticos, y que es necesario y suficiente para controlar el aumento del nivel de agua subterránea bajo la ciudad en un escenario de clima húmedo.*

### **2.3.2 Efectos en la disponibilidad de agua para el Proyecto Chavimochic**

Para Trujillo, la variable que realmente importa es la futura fluctuación en el nivel de agua disponible para el Proyecto Chavimochic en el Río Santa.

En base a modelos de la escorrentía de lluvia y de los glaciares, MINAM y SENAMHI han evaluado las fluctuaciones de los caudales en Cerro Cóndor, situado aguas arriba de la toma del Canal Chavimochic. Los resultados en ambos

modelos climáticos *indican un aumento del caudal todos los meses y un incremento de alrededor del 15% en los meses más secos*, en relación con el período de 1969-1989. *Esto parece indicar que, durante el horizonte de 2030-2039, las fluctuaciones del caudal producidas por el clima no causarán problemas en el suministro de agua a través del Canal Chavimochic.*

El previsto aumento de caudal incluye un componente de escorrentía adicional debido a la disminución del hielo en la cuenca. Este componente desaparecerá con el tiempo a medida que se derriten los glaciares. Sin embargo, un análisis de la velocidad del derretimiento hasta la fecha parece indicar que los glaciares no desaparecerán durante el horizonte temporal considerado (hasta 2039).

### **2.3.3 Efectos en el riego**

El riego reviste gran importancia para la economía y el bienestar social de Trujillo. Las planicies costeras adyacentes a Trujillo son prácticamente desérticas. La precipitación anual media en Trujillo es insignificante y, por consiguiente, la incertidumbre en las estimaciones de lluvia tiene escaso efecto en el riego. Puesto que no se prevé una reducción del agua disponible para el Proyecto Chavimochic hasta 2039, la evaluación del impacto del cambio climático se ha limitado a un análisis acelerado de los cambios en la evapotranspiración. El análisis parece indicar que la fluctuación de la futura demanda anual de agua para riego en la zona de Trujillo podría ser de alrededor de +6 % y que la fluctuación durante el mes más decisivo puede ser de +7%. Estos efectos, si se materializan, podrían ser compensados por una reducción del 26% en la programada ampliación en la tercera etapa del proyecto. En caso contrario, la demanda de agua para riego podría reducirse a un nuevo nivel (sostenible) mediante una inversión en equipo de riego que permita el ahorro de agua o mediante un ajuste de los sistemas de cosecha y riego. No obstante, la adopción de estas medidas y la cuantificación de sus posibles efectos requerirá un análisis más detallado que no es posible efectuar en este estudio.

## **2.4 Plan esquemático de adaptación**

Dada la incertidumbre que caracteriza la evaluación de los efectos del cambio climático, las medidas de adaptación especificadas y categorizadas en este estudio de caso se orientan principalmente a lo siguiente:

- Escenarios favorables para todas las partes (el sistema no solo se beneficia mediante su adaptación al cambio climático).
- Opciones sin consecuencias que pueden lamentarse (adelantos que constituirán una buena inversión, independientemente de la evolución del clima).
- Estudios que fomentan el conocimiento y ayudan a reducir la incertidumbre.

Se han especificado numerosas medidas de adaptación, que se han clasificado de manera preliminar usando una matriz de calificación con criterios múltiples centrada, entre otras cosas, en las pautas mencionadas anteriormente. La cate-

gorización de opciones mediante el uso de este análisis con criterios múltiples será siempre subjetiva y podría variar si se modifican los criterios y la importancia que se les asigna. Seguidamente se describen las medidas de adaptación recomendadas en el orden asignado tras la calificación inicial. Las opciones de adaptación recomendadas y su calificación deberán examinarse con las partes interesadas en Trujillo, y la lista deberá ajustarse en la versión final de este informe..

#### **2.4.1 Medidas generales de adaptación**

- 1.1 Deberá iniciarse un *estudio detallado del cambio climático* en la cuenca del Río Moche y las zonas adyacentes de conformidad con la labor realizada en la Cuenca del Río Santa. El objetivo es reducir la considerable incertidumbre en torno a las proyecciones climáticas y, al menos, limitar los efectos a una disminución o un aumento del caudal en la estación de Quirihuac. Esta labor debe incluir varios modelos climáticos y una reducción dinámica de la escala.
- 1.2 Deberá *constituirse un equipo* a cargo de modelar el sistema de agua subterránea a fin de realizar estudios más detallados de la interacción entre las aguas subterráneas y de superficie del acuífero del Valle de Moche. Esta labor deberá habilitar a las autoridades de Trujillo, SEDALIB y Chavimochic *para actuar con diligencia frente a los posibles cambios del clima y los sistemas de bombeo* a fin de mejorar las medidas para combatir la congestión de drenajes sin el riesgo de crear un bombeo excesivo.

#### **2.4.2 Adaptación a un clima más seco**

- 2.1 *Realizar estudios de simulación detallados* a fin de determinar con más exactitud los niveles sostenibles de bombeo en el acuífero. Las evaluaciones rápidas en este estudio indican que el previsto incremento de los niveles de bombeo hasta 2018 es sostenible en el marco del clima más seco pronosticado.
- 2.2 *Negociar opciones para aumentar el suministro de agua para los hogares desde el Canal Chavimochic* si los nuevos estudios climáticos indican la presencia de un clima más seco que el analizado en este estudio o si se determina mediante un análisis detallado que el ritmo de bombeo programado es insostenible.
- 2.3 *Comenzar a prepararse para un aumento de la demanda de agua para riego*. El calculado aumento de la demanda de agua para riego de un 6% anual y un 7% durante el mes más crucial (diciembre) no parece ser motivo de alarma. Puesto que el Proyecto Chavimochic no está totalmente desarrollado aun existe un excedente de recursos hídricos que permitiría ajustarse a esos cambios. No obstante, las proyecciones deben refinarse y tomarse en cuenta en la planificación de nuevas obras, o compensarse con modificaciones en los sistemas de cosecha o con el ahorro de recursos hídricos.
- 2.4 *Hacer un seguimiento de los niveles de agua subterránea* en el acuífero, sobre todo a lo largo de la costa, a fin de modificar las modalidades de bombeo en caso de producirse un exceso de extracción.
- 2.5 *Reducir la demanda bruta* minimizando las pérdidas en el sistema de distribución (reducción de la presión y reemplazo de partes).

2.6 *Poner en marcha iniciativas de gestión de la demanda* destinadas a reducir la demanda neta, ya sea creando mayor conciencia, estableciendo políticas de precios o restringiendo el uso de agua. En los previstos escenarios de bombeo la demanda solo se satisface hasta 2020, y una reducción de la demanda podría posponer la necesidad de usar otras fuentes.

2.7 *Ampliar la extracción del Canal Chavimochic y aumentar la capacidad de la planta de tratamiento*, si los nuevos análisis del escenario de bombeo en 2018 indican que es insostenible. Se propone una ampliación de 750 l/s a fin de compensar la diferencia entre el nivel actual de bombeo y las tasas propuestas de bombeo en el futuro.

### **2.4.3 Adaptación a un clima más húmedo**

3.1 *Efectuar estudios más detallados de la interacción entre las aguas subterráneas y el agua de superficie* en el acuífero del Valle de Moche para confirmar las conclusiones de este estudio y planificar una mayor reducción de la congestión de drenajes.

3.2 *Examinar las oportunidades* para ampliar los programas de desarrollo del Proyecto Chavimochic creadas por una mayor disponibilidad de agua.

3.3 *Incrementar el bombeo en SEDALIB al nivel programado de 1500 l/s* y suministrar esa agua en la ciudad si su calidad lo permite. En el escenario de bombeo las condiciones parecen permitir contrarrestar los efectos negativos de un clima más húmedo.

3.4 *Aumentar el bombeo para riego en el Valle*, como lo propone Chavimochic en el Escenario 3 del estudio anterior (Referencia 6)

3.5 *Extraer agua del río para su exportación fuera de la cuenca*. Esto podría ayudar a reducir la congestión de drenajes, aunque se necesita una mayor labor de investigación y cuantificación.

3.6 *Restringir el riego en ciertos sectores del valle*. Si la congestión de drenajes no puede controlarse por otros medios, podría ser necesario restringir el riego en ciertos sectores del valle a determinados tipos de cultivo que consumen menos agua y producen menos filtración.

## **2.5 Enseñanzas adquiridas en este estudio de caso**

En situaciones en que la incertidumbre en la evaluación del cambio climático no permite determinar a ciencia cierta si en el futuro el clima será más húmedo o más seco, podría ser difícil especificar opciones estructurales sin consecuencias lamentables antes de contar con pronósticos climáticos más precisos. Por tanto, debe darse prioridad al mejoramiento de los pronósticos climáticos locales.

Para aumentar el bombeo de aguas subterráneas en el escenario de clima seco se necesitarían una evaluación, planificación y gestión detalladas.

### 3 **Análisis de la susceptibilidad y vulnerabilidad del sistema**

#### 3.1 **Aspectos generales**

El análisis acelerado de vulnerabilidad descrito en esta sección tienen por finalidad determinar si el sistema de suministro de agua de Trujillo puede resistir los cambios climáticos, sobre todo en períodos de sequía.

La vulnerabilidad de un sistema frente al cambio climático no solo depende del cambio climático en esa localidad sino también de sus efectos en los recursos hídricos; también depende de la susceptibilidad del sistema a variar frente a esos cambios y de su capacidad para adaptarse.

Es improbable que los sistemas de suministro que reciben el agua de una fuente abundante -por ejemplo, si al agua que se extrae solo representa una parte insignificante del caudal de un río importante- serán afectados por los cambios en el caudal del río, incluso si los cambios son considerables. En estos casos podría no ser necesario, desde el punto de vista del suministro, hacer grandes esfuerzos por adaptarse al cambio climático.

En principio, un sistema podría tener una capacidad congénita que facilita su adaptación a fuertes cambios en la disponibilidad de recursos. En estos casos también se puede sostener que el sistema es resistente al cambio climático y los nuevos análisis de adaptación pueden evitarse o posponerse. No obstante, en general los sistemas de suministro de agua son concebidos para abastecer a una población de cierto tamaño (en muchos casos similar al tamaño actual) con un volumen suficiente de agua en las condiciones hidrológica actuales. Puesto que la población beneficiaria probablemente aumentará en el futuro, y que en muchos casos las iniciativas para reducir el consumo per cápita se adoptan en la medida que son necesarias; en la práctica pocos sistemas tienen una capacidad excedente importante que puede usarse como reserva frente a una posible reducción del agua disponible.

En las cuencas en que los recursos hídricos se comparten entre varios sectores (por ejemplo, los hogares y el sector industrial, la producción de energía, la agricultura y el medio ambiente) frecuentemente se da mayor prioridad al suministro de agua potable. Debido a esto, el suministro para hogares podría no ser directamente vulnerable al cambio climático pues un gran volumen de extracción en otros sectores (en muchos casos el riego) podría proteger adecuadamente ese suministro frente al cambio climático. No obstante, un sistema en el que algunos sectores se sacrifican para proteger otros puede crear fácilmente problemas de índole política. La necesidad de adaptarse seguirá existiendo, pero simplemente se pasará de un sector a otro.

### 3.2 ¿Podría ser vulnerable al cambio climático el suministro de agua de Trujillo?

Dados el fuerte incremento de la población urbana y la demanda de agua previstos en las próximas décadas, y que en la actualidad la capacidad se ajusta a la demanda, el sistema de suministro de agua de la ciudad probablemente es susceptible y vulnerable frente a las fluctuaciones del agua disponible en la toma de agua de superficie en el Canal Chavimochic y en el acuífero del Valle de Moche.

SEDALIB suministra más la tercera parte (750l/s) del agua para consumo doméstico (2000 l/s) usando pozos en el acuífero del Valle de Moche y ha programado aumentar el bombeo a fin de satisfacer el futuro aumento de la demanda previsto (Referencia 1). Este proyecto podría ser alterado por los efectos del cambio climático en el acuífero.

Los elevados niveles de las aguas subterráneas en el Valle de Moche causan actualmente dificultades en la infraestructura de Trujillo. La actual congestión de los drenajes podría agravarse si los cambios climáticos en la Cuenca alta del Río Moche producen condiciones más húmedas, que podrían aumentar el nivel de agua subterránea y las descargas del río en el acuífero.

Por tanto, en el estudio se investigarán los efectos de los previstos cambios climáticos en la Cuenca alta del Río Moche en el nivel de las aguas subterráneas en el acuífero. Puesto que en la actualidad la precipitación en Trujillo equivale a menos del 1% del posible nivel de evapotranspiración (Referencia 10), es improbable que incluso un cambio climático más pronunciado en la ciudad pueda tener un efecto importante en los recursos hídricos del área, y por consiguiente no serán objeto de más estudio.

Si bien el caudal del Canal Chavimochic será susceptible a variar si se producen cambios en el régimen de caudales del Río Santa, esos cambios podrían no afectar el suministro para consumo de los hogares en Trujillo puesto que dicho suministro tiene prioridad y que la demanda en ese sector representa una parte pequeña del caudal del canal. Por consiguiente, las actividades de riego ofrecen un amortiguador que protege el suministro para consumo de los hogares frente a los efectos del cambio climático. No obstante, en este estudio se analizarán los cambios previstos del caudal del Río Santa para determinar si podrían reducirse, lo cual puede dificultar a SEDALIB la extracción de más agua en el futuro.

## **4 Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua y las condiciones del agua subterránea**

### **4.1 Cambios climáticos previstos en Trujillo y la Cuenca del Río Moche**

No hay proyecciones específicas de los cambios de temperatura y precipitación en la Cuenca del Río Moche (y Trujillo) disponibles para este estudio de caso. Por consiguiente, los escenarios de cambio climático en la Cuenca del Río Moche usados en este estudio provienen de los mapas en escala nacional preparados en el marco de la Segunda Comunicación Nacional (Referencia 3), que es la evaluación del cambio climático más reciente disponible. La evaluación está basada en los escenarios climáticos mundiales (escenarios de índice de emisiones A2), usando metodologías dinámicas y estadísticas de reducción de la escala reconocidas por el IPCC.

#### **4.1.1 Cambios en la precipitación**

Se han analizado los previstos cambios en la precipitación hasta 2030 en base al mapa nacional de cambios de temperatura (gráfico 4.1, Referencia 2). El mapa es de escala nacional y, por consiguiente, demasiado general para hacer evaluaciones para la Cuenca del Río Moche, que sólo representa el 0,2 % del territorio nacional. No obstante, se ha usado para la evaluación pues actualmente es la única fuente de información disponible para la zona.

En el área de interés, indicada con un rectángulo azul en los gráficos, se observa que la precipitación media alrededor del año 2030 se desvía entre -10% y +10% del nivel actual. En este caso, se han aplicado factores del cambio de 0,9 y 1,1 en las series observadas de precipitación a fin de representar un escenario seco y un escenario húmedo, respectivamente.

#### **4.1.2 Cambios en la temperatura**

En este caso también la única información disponible sobre los previstos cambios en la temperatura son los mapas de escala nacional. En el gráfico 4.2 se indican los cambios previstos en la temperatura anual máxima hasta el año 2030, y el gráfico 4.3 contiene un mapa similar de los cambios en la temperatura mínima anual. En el área de interés, indicada con un rectángulo azul en ambos gráficos, la temperatura mínima podría aumentar de 0,4 ° C a 0,8 ° C y la temperatura máxima de 0,4 a 1,2 ° C.

Si damos por supuesto que los cambios en las temperaturas máxima y mínima son representativos de la evolución de las temperaturas medias promedio, en este estudios de caso los aumentos de la temperatura en la Cuenca del Río Moche hasta 2030 se han calculado en 0,4 ° C y 1,2 ° C, representando el escenario de clima seco y el de clima húmedo, respectivamente. En los mapas se observan menores aumentos de la temperatura en el área de servicio de Chavimochic cerca de Trujillo, en la costa del Pacífico. En esta zona, las estimaciones del aumento de la temperatura (0,4 ° C y 0,8 ° C durante el período que termina en 2030) parecer ser más realistas.

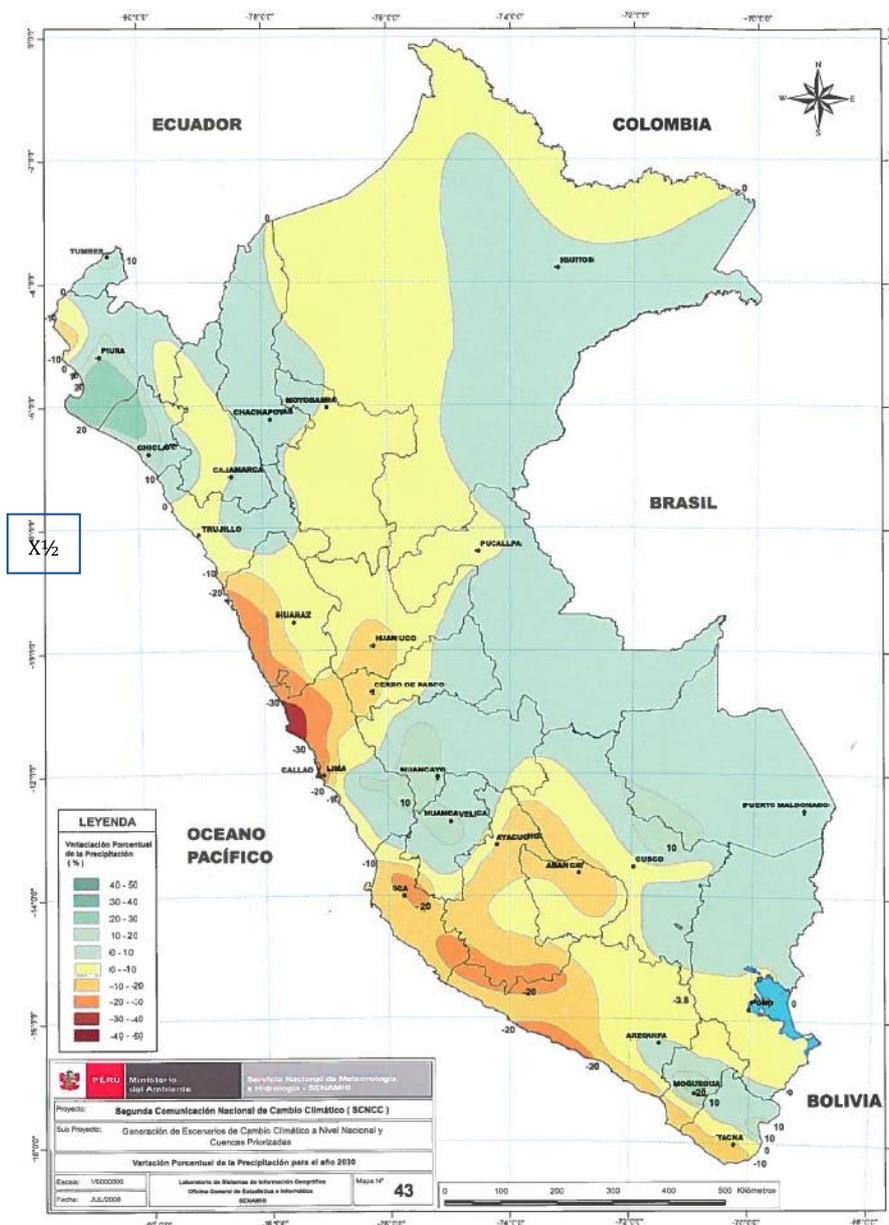


Gráfico 4.1 Previsto cambio en la precipitación (como porcentaje de los valores actuales) hasta 2030 en Perú.

Fuente: Segunda Comunicación Nacional (Referencia 2).

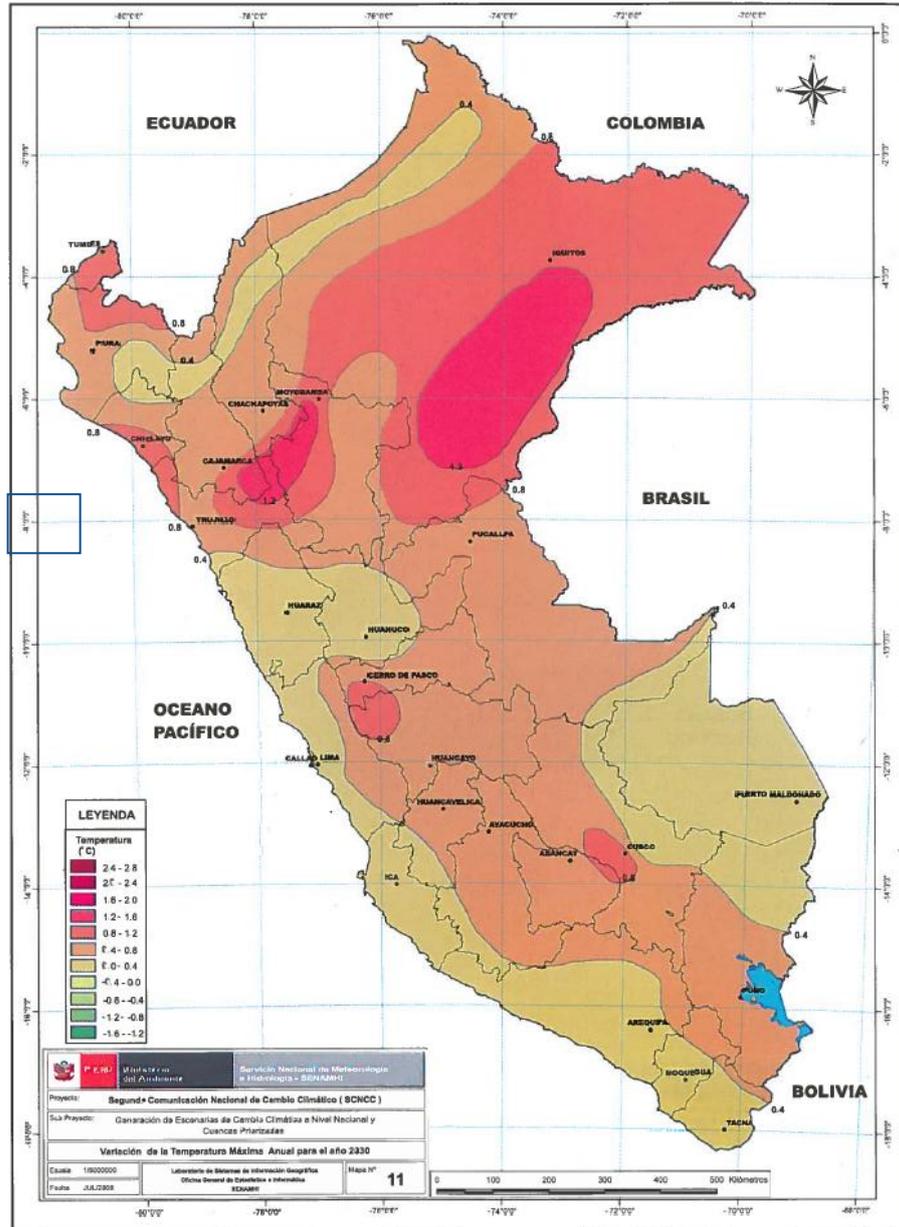


Gráfico 4.2 Previsto cambio en la temperatura máxima diaria hasta 2030 en Perú.

Fuente: Segunda Comunicación Nacional (Referencia 2).

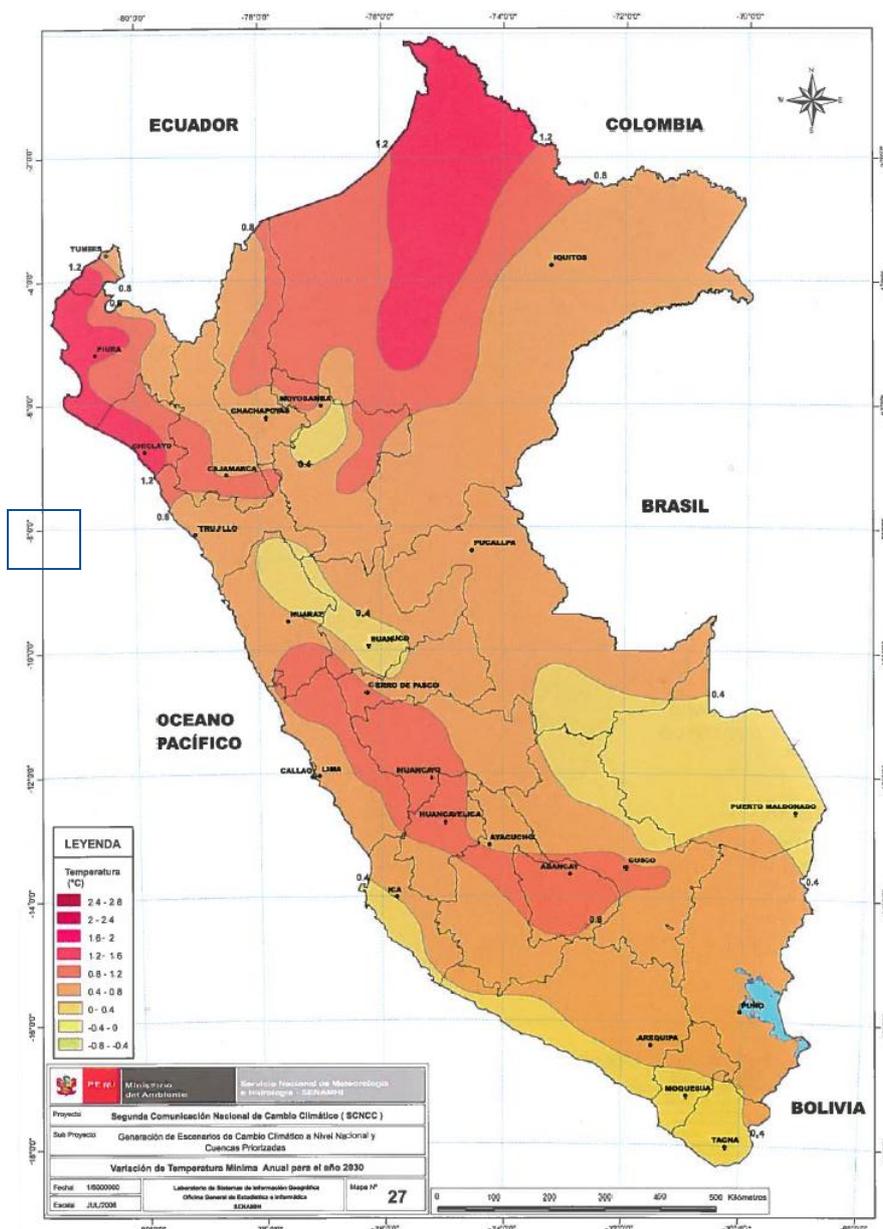


Gráfico 4.3 Previsto cambio en la temperatura mínima diaria hasta 2030 en Perú.

Fuente: Segunda Comunicación Nacional (Referencia 2).

#### 4.1.3 Efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche y en la recarga del acuífero

##### 4.1.3.1 Enfoque

Si bien la Ciudad de Trujillo está situada en el desierto, en la actualidad los principales problemas de agua para la ciudad parecen ser los de saturación de suelos y la congestión de drenajes, más que la escasez y la sequía. Las aguas sin tratar para el suministro de la ciudad son aguas subterráneas del acuífero del Valle de Moche y aguas de superficie canalizadas por medio del Proyecto Chavimochic desde el Río Santa en el sur.

El suministro de agua para Trujillo está protegido de la sequía por las siguientes razones:

- a) Tiene la mayor prioridad entre los usuarios servidos por el Canal Chavimochic.
- b) El agua subterránea es actualmente abundante (los niveles están aumentando) en el Acuífero del Valle de Moche.
- c) El volumen de las afluencias en el acuífero que se originan de la descarga desde la Cuenca del Río Moche río arriba es pequeño.

La saturación de suelos en Trujillo parece tener su origen en el agua transferida al acuífero a través de la filtración desde los canales y tierras de regadío que, en parte al menos, usan el agua del Canal Chavimochic (agua de superficie transportada).

En el presente estudio de caso se analiza la vulnerabilidad del “balance hídrico” del acuífero del Valle de Moche frente a los cambios climáticos en la Cuenca alta del Río Moche. El análisis se hace como parte de una evaluación de los efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche usando un modelo de escorrentía para toda la cuenca río arriba y otras simulaciones de las condiciones del agua subterránea en el acuífero del Valle de Moche mediante un modelo de aguas subterráneas para determinar los efectos en el acuífero de los cambios en el caudal del río y el previsto incremento de la demanda para consumo de los hogares en el futuro. El modelo fue usado anteriormente por el Proyecto Chavimochic para estudiar las posibilidades de reducir la congestión de drenajes (Referencia 6).

### **Aumento del nivel del mar**

Un análisis detallado de los efectos de un aumento del nivel del mar está fuera del alcance de este estudio y, por consiguiente, en esta sección solo se resumen los problemas posibles que eso podría causar. El estudio especial de caso de Trinidad y Tabajo en el marco de este proyecto (Referencia 15) está dedicado a los efectos del aumento del nivel del mar y en él se describen con más detalle posibles medidas de adaptación.

El aumento del nivel del mar en la zona de Trujillo será causado por un aumento del nivel global en la región, que es producto de la expansión térmica del agua de mar y del derretimiento de las capas polares, las condiciones hidrográficas locales y los cambios tectónicos en los niveles del terreno. En la Referencia 15 se citan las proyecciones más recientes del aumento del nivel mundial del mar, que sería de unos 40 cms. para 2050 y de unos dos metros a fines del siglo XXI.

A menos que se compense con un levantamiento tectónico del terreno, el aumento del nivel del mar tendrá efectos en la congestión de drenales y en los niveles de salinidad de las aguas subterráneas en las cercanías de la actual línea costera. La línea costera podría retroceder también como consecuencia de los cambios en el nivel del mar.

La gradiente en la línea costera de Trujillo es alrededor del 1 %, y la elevación del terreno, a un kilómetro de la costa, es de unos 10 metros sobre el nivel ac-

tual del mar. Si bien un aumento del nivel del mar puede afectar los niveles del agua subterránea más tierra adentro, en las áreas costeras los niveles de aguas subterráneas ya están bastante cerca de la superficie (véase el apéndice B). Por tanto, de ser necesario deberá ser posible limitar los efectos del aumento del nivel del mar a la zona costera instalando drenajes paralelos a la costa, ya sean canales con desagüe por gravedad o mediante bombeo.

Se ha observado ya una intrusión salina en el acuífero cercano a la costa, y este problema podría agravarse si aumenta el nivel del mar. Según SEDALIB, se ha dejado de bombear agua subterránea cerca de la costa debido a los problemas de salinidad. Por tanto, estos efectos no deberán poner en peligro el suministro para la ciudad.

Se estima que la posible intrusión salina a través de la boca del río no constituye un problema pues no se extrae agua dulce cerca del mar. Si en el futuro esto crea problemas podrían instalarse barreras a fin de remediarlo.

#### **4.1.3.2 Efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche**

Para analizar las posibles consecuencias de los previstos cambios climáticos en el Río Moche, se ha constituido y calibrado un modelo conceptual de escorrentía (El modelo NAM, Referencia 4) en la Cuenca del Río Moche aguas arriba de la estación de medición de caudales de Quirihuac (véase el gráfico 4.4). La cuenca alta tiene una superficie total de 1.830 km<sup>2</sup> y una elevación media de 2.680 metros sobre el nivel del mar.

El modelo NAM puede caracterizarse como un modelo determinístico, agregado y conceptual para medir humedad con pocos requisitos de entrada de datos. El modelo se seleccionó porque ha demostrado su capacidad para simular variaciones climáticas a corto plazo, por ejemplo, series de años secos o húmedos y, por consiguiente, deberá servir también para simular los cambios climáticos pronosticados en la Cuenca del Río Moche. El modelo es un instrumento técnico probado que se ha usado en numerosas zonas de captación en todo el mundo, con diversos regímenes hidrológicos y condiciones climáticas, incluidos los Andes Peruanos.

El modelo se calibró con registros diarios de caudales de la estación de Quirihuac correspondientes al período de 1992-2004, usando como insumos series de precipitación diaria obtenidas de estaciones locales en la cuenca. Fue posible calibrar el modelo para encajar el balance hídrico a largo plazo del período de calibración dentro del 1%, y el modelo permite simular la mayoría de los años en el período de calibración, con buenos resultados tanto en años secos como húmedos. El gráfico 4.7 incluye una comparación entre los caudales medios mensuales simulados y los observados para el período de calibración.

El apéndice A de este informe contiene más detalles sobre la instalación del modelo y su calibración.

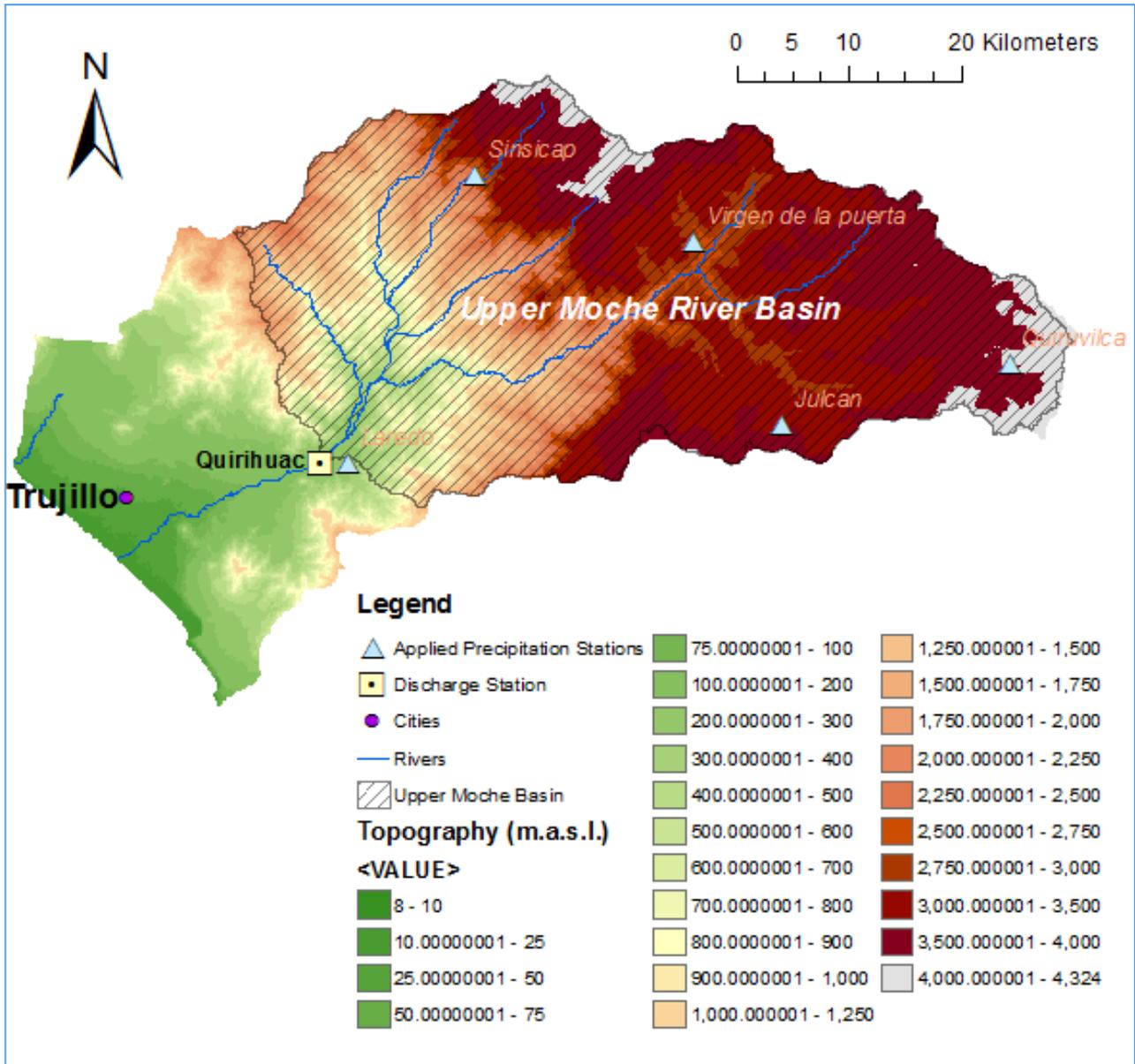


Gráfico 4.3 Ubicación geográfica de las estaciones hidrológicas usadas en el modelo de escorrentía de lluvia en la Cuenca alta del Río Moche .

### Simulación de los efectos del cambio climático

El modelo calibrado se ha usado para simular dos escenarios de cambio climático:

- Un escenario de clima seco que combina un pequeño incremento de la temperatura (0,4 ° C) con un fuerte incremento de la lluvia (+10%).
- Un escenario de clima seco que combina un fuerte incremento de la temperatura (+1.2 ° C) con una reducción del 10% de la lluvia.

Los escenarios analizados se indican en el cuadro 4.2 y son los más extremos de los cuatro escenarios surgidos al combinar los límites de los escenarios de cambio climático descritos en la sección 4.1.

Mediante estos análisis se ha determinado que el 75% de la corriente mensual probable en Quirihuac varía en factores de 1,37 en el escenario húmedo y de 0,57 en el escenario seco. Los factores correspondientes para el 75% probable del caudal básico (contribución del agua subterránea) son 1,41 para el escenario húmedo y 0,55 para el escenario seco.

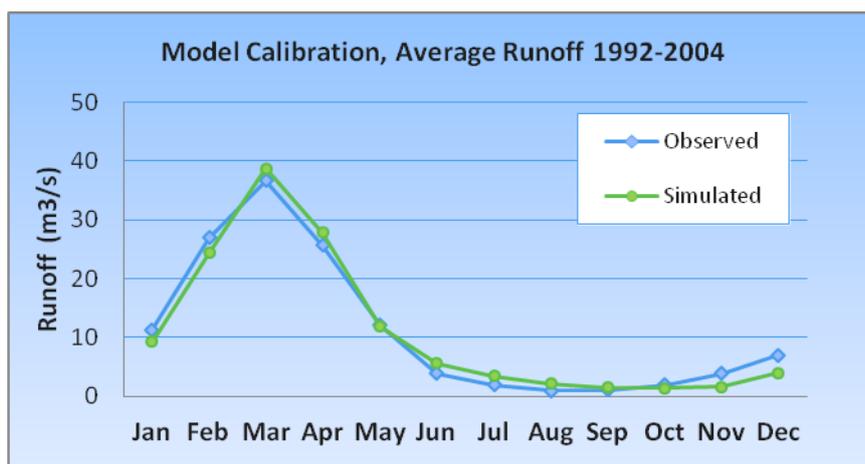


Gráfico 4.4. Calibración del modelo NAM para la zona de captación (cuenca) del Río Moche. Correntía mensual media simulada y observada en Quirihuac.

Cuadro 4.1. Escenarios simulados de cambio climático.

Cambio de temperatura	Cambio de la precipitación (factor)	Cambio ET <sub>0</sub> estimado (factor)	Incluido en el análisis
Grados celcius	Fracción	Fracción	-
+0,4	1,1	1,02	Sí, húmedo
+0,4	0,9	1,02	No
+1,2	1,1	1,04	No
+1,2	0,9	1,04	Sí, seco

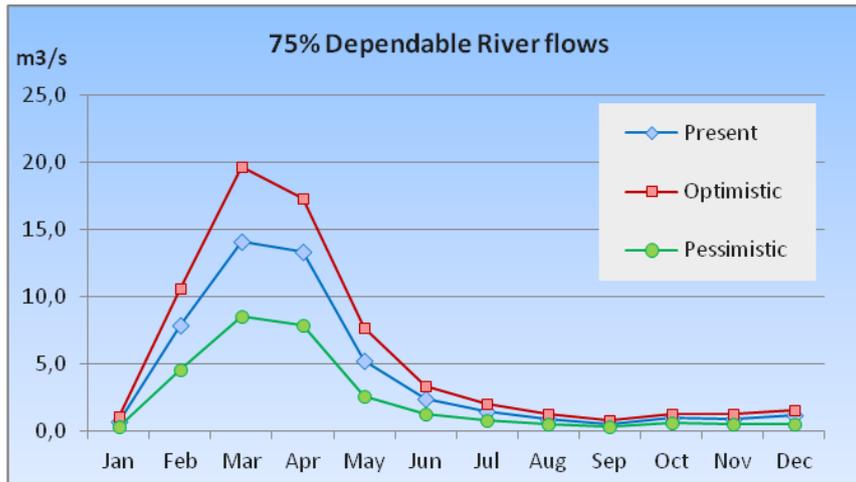


Gráfico 4.5 El 75% de los caudales mensuales seguros simulados del Río Moche (Cuirihuac), en condiciones actuales y en escenarios optimistas y pesimistas del clima en el futuro.

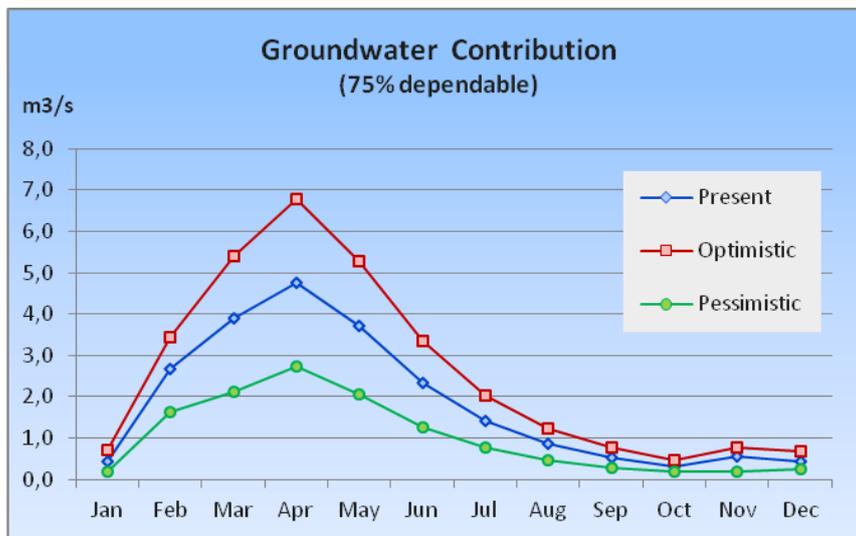


Gráfico 4.6 El 75% de las contribuciones seguras del agua subterránea al Río Moche aguas arriba de Cuirihuac, en condiciones actuales y en escenarios optimistas y pesimistas del clima en el futuro.

#### 4.1.3.3 Efectos del cambio climático en el acuífero del Río Moche

Los efectos climáticos en la viabilidad del bombeo en el acuífero se analizaron mediante un modelo de aguas subterráneas (Referencia 6). El modelo se elaboró originalmente para Chavimochic a fin de estudiar escenarios de bombeo para aliviar la congestión de drenajes y está basado en el sistema de simulación de aguas subterráneas Visual MODFLOW (Referencia 7). Este es un modelo de diferencia finita en dos dimensiones del acuífero del Valle de Moche que abarca desde la estación de medición de Quirihuac aguas arriba hasta la costa, aguas abajo. La Ciudad de Trujillo está situada al centro del área incluida en el modelo y cubre gran parte del acuífero. La zona cubierta por el modelo está indicada con un rectángulo azul en el gráfico 4.11, y el acuífero se indica con amarillo en los mapas. El acuífero es freático y está formado por depósitos aluviales cuaternarios.

El modelo incluye todos los pozos de bombeo en la zona, con las tasas actuales o propuestas de bombeo. Las simulaciones anteriores parecen indicar que el 9,7% de las afluencias en el acuífero son aguas filtradas desde el Río Moche, el 13,6% es agua subterránea proveniente de las capas superiores del acuífero y el 76,7% restante es agua filtrada de los sistemas de riego.

La precipitación en la zona baja del Valle de Moche es insignificante, como se señaló en la sección 3.2. Por consiguiente, los efectos del cambio climático en el acuífero se han simulado modificando los límites de las afluencias aguas arriba en el modelo y las filtraciones desde el río.

Dado el alcance de este estudio, no fue posible reconsiderar la calibración del modelo ni hacer una nueva calibración. Por consiguiente, se da por supuesto que el modelo permite simular adecuadamente las condiciones del acuífero.

En los siguientes párrafos se describen los resultados de los análisis de la condición de las aguas subterráneas en el marco de los dos escenarios climáticos proyectados. Estos análisis se explican con más detalle en el apéndice B del informe.

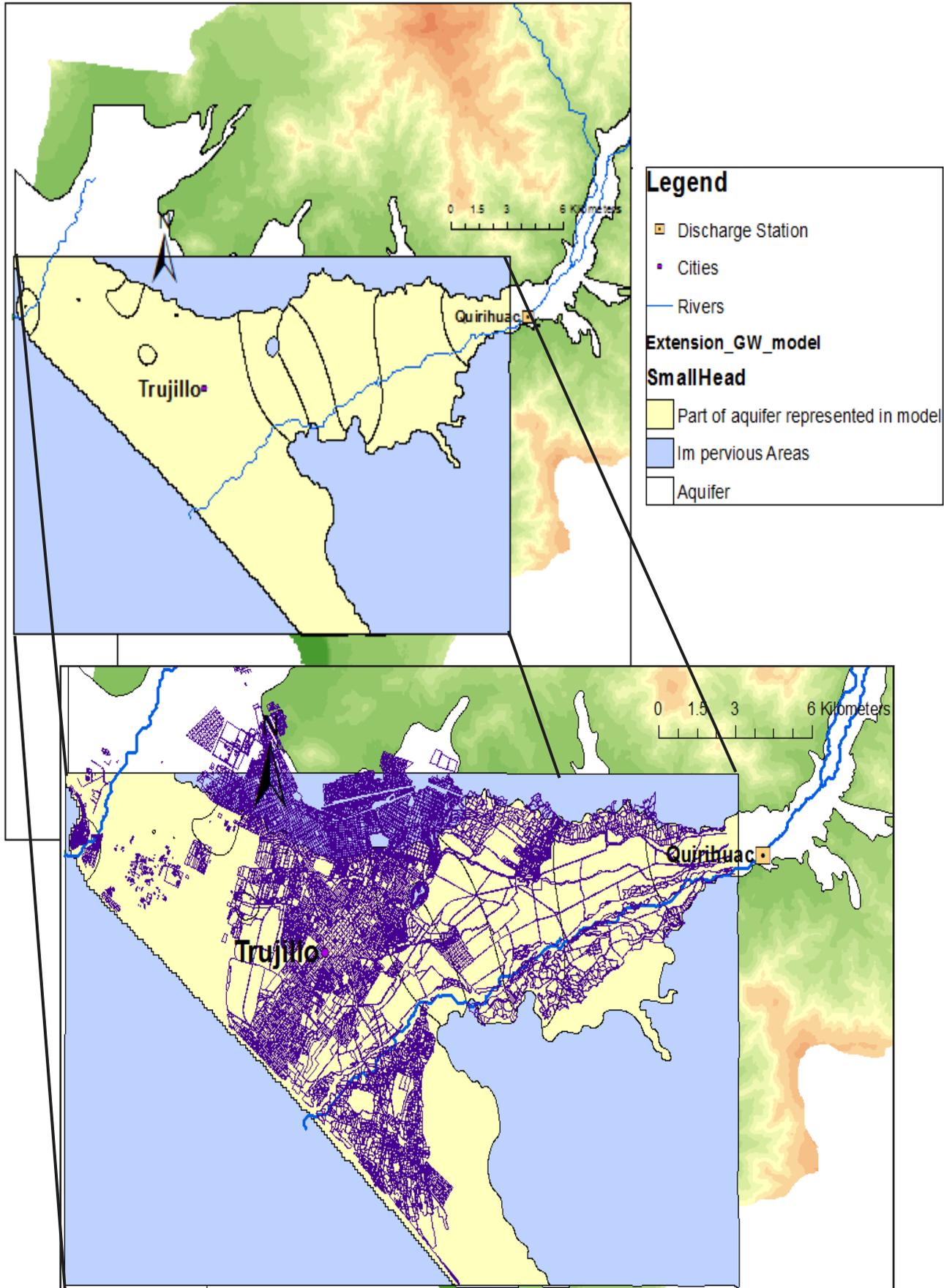


Gráfico 4.7. Cobertura del modelo Chavimochic del acuífero del Valle de Moche.

#### **4.1.3.4 El nivel actual de extracción de agua subterránea en escenarios futuros de clima**

Se simularon los niveles de agua subterránea para dos escenarios climáticos futuros y se compararon con una simulación de las condiciones actuales. En los gráficos 4.9 y 4.10 se indica el incremento simulado de la capa freática en relación con las condiciones actuales en un escenario de clima seco y un escenario húmedo, respectivamente.

##### **Escenario futuro de clima seco**

Dado que disminuyen las afluencias de agua subterránea en el acuífero y el río tiene menos agua, en un clima más seco los niveles de agua subterránea serán más bajos (gráfico 4.9). Los efectos agregados en los niveles de agua subterránea, que se señalan el cuadro 4.2, incluyen una caída promedio de 1,2 metros del nivel del acuífero como un todo y una caída promedio de 0,9 metros en la sección del acuífero donde la profundidad del agua subterránea es actualmente inferior a 5 metros. En el gráfico 4.11 se indican las áreas de agregación.

Los niveles de agua señalados en los gráficos se obtienen del modelo tras seis años de simulación, una vez que se han estabilizado. Puesto que no hay indicaciones de una reducción de los niveles, puede concluirse que el actual volumen de bombeo es sostenible incluso en un futuro escenario de clima seco.

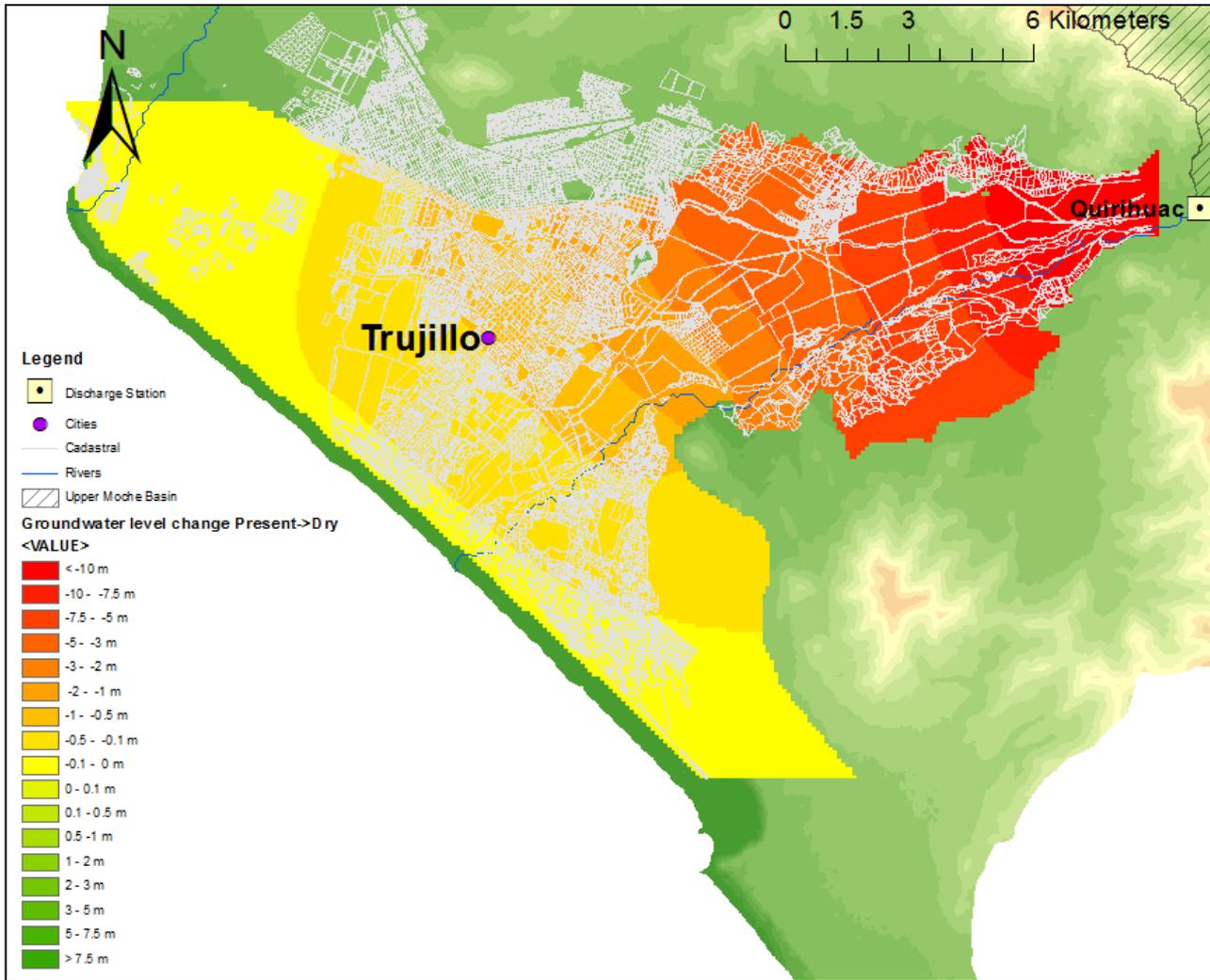


Gráfico 4.8. Incremento simulado del agua subterránea desde los niveles actuales a los niveles existentes en un escenario de clima seco. Los valores negativos indican una reducción de la capa freática.

## Escenario futuro de clima húmedo

En el escenario de clima húmedo (gráfico 4.10) los niveles de agua subterránea aumentan en todo el acuífero debido al incremento del caudal del río y las afluencias de agua subterránea. Se ha calculado que el aumento promedio es de 0,52 metros en el acuífero como un todo y de 0,32 metros en el área general, donde las aguas ya están a menos de cinco metros de la superficie (cuadro 4.2)

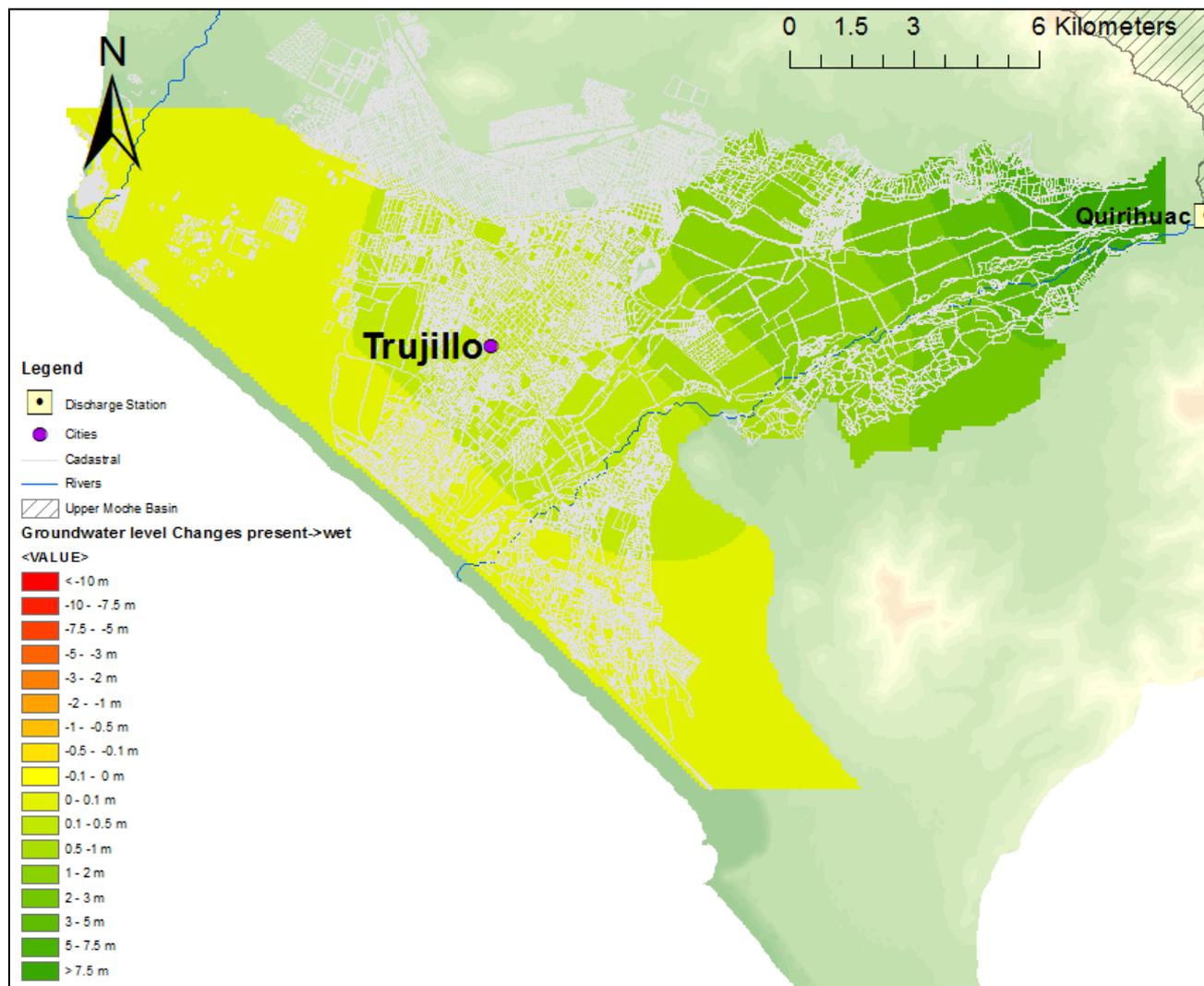


Gráfico 4.9 Incremento simulado del agua subterránea desde los niveles actuales a los niveles existentes en un escenario de clima húmedo. Los valores negativos indican una reducción de la capa freática.

Cuadro 4.2 Aumentos simulados de los niveles de agua subterránea en el acuífero del Moche (niveles actuales de bombeo) en el futuro. Las variaciones se indican como “máximo”, “mínimo” y “promedio” en el acuífero como un todo y en la sección del acuífero donde la distancia simulada entre el agua subterránea y la superficie es inferior

a cinco metros. Las dos áreas de agregación se indican en el gráfico 4.11.

Clima futuro	Área de la muestra	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
Seco	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	-11,34	0,00	-1,19
Seco	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	-5,14	0,00	-0,88
Húmedo	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	0,00	7,73	0,52
Húmedo	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	0,00	2,21	0,32

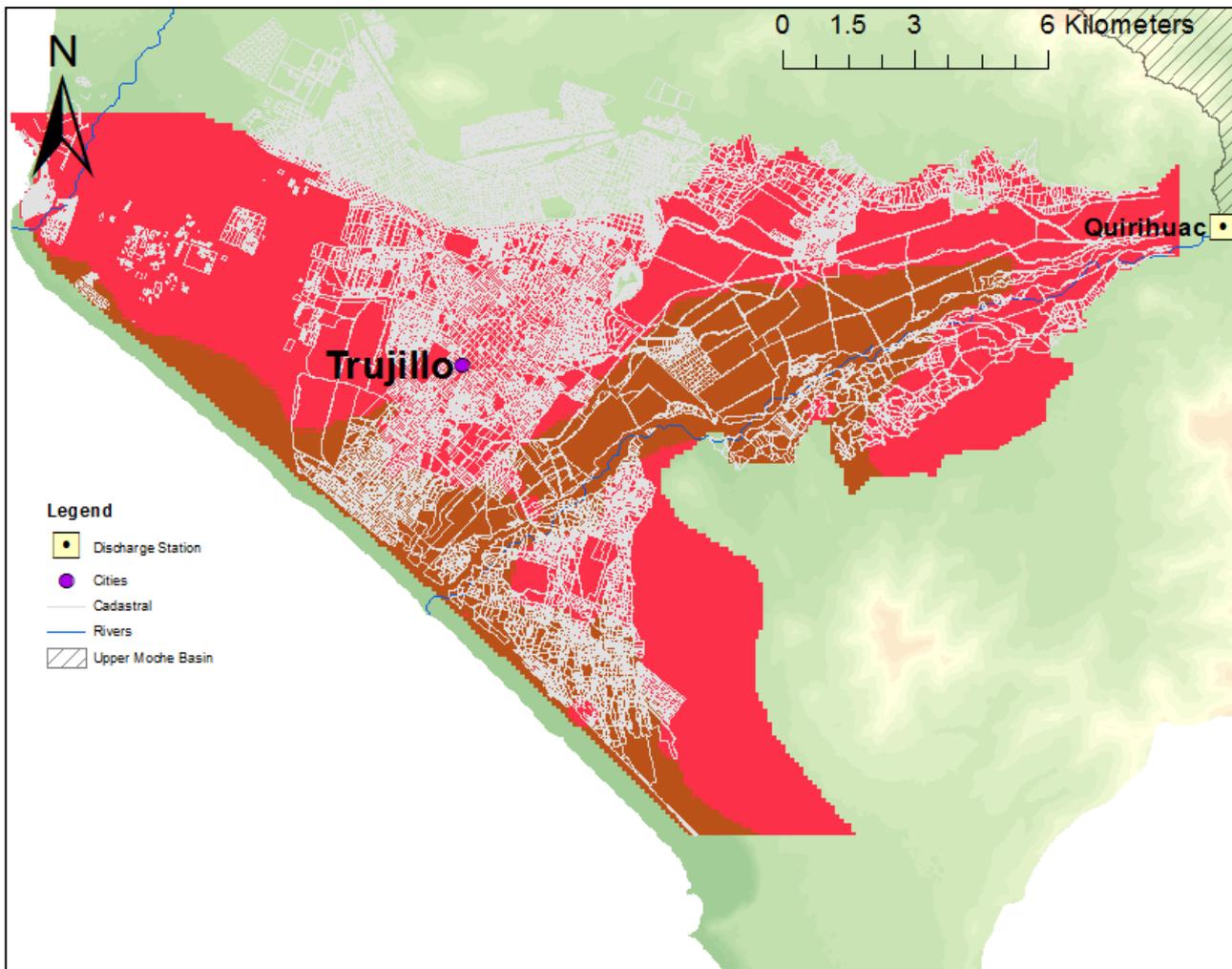


Gráfico 4.10 Zonas de agregación: todo el acuífero (rojo) y secciones donde la distancia simulada entre el agua y la superficie es inferior a cinco metros en el escenario (café).

#### 4.1.3.5 El bombeo en escenarios de clima futuros

El Plan Maestro de 2005 de SEDALIB (Referencia 8) incluye una proyección de la futura demanda de agua para Trujillo y un propuesto incremento del bombeo en el acuífero del Valle de Moche a fin de satisfacer esa demanda (gráfico 4.12). Con el fin de satisfacer la demanda hasta 2018 se propone aumentar el bombeo de 520 l/s (en 2005) a 1500 l/s en 2018.

Los escenarios de cambio climático incluidos en este estudio corresponden al período que termina en 2030 y, por consiguiente, es improbable que los cambios climáticos aquí notificados puedan producirse dentro del horizonte del previsto escenario de bombeo de 2005-2018. No obstante, se ha considerado conveniente tratar de determinar si las propuestas tasas de bombeo serán sostenibles en el marco de los previstos escenarios climáticos y examinar sus efectos en los niveles de agua subterránea.

Por lo tanto, las tasas de bombeo en los pozos de SEDALIB en el actual escenario de bombeo se han aumentado al nivel propuesto de 1500 l/s usando el mismo factor de aumento en todos los pozos; por su parte, el escenario de bombeo se ha situado tanto en el escenario de clima seco como en el de clima húmedo. Los resultados se indican en los gráficos 4.13 y 4.14, donde se representan las fluctuaciones de los niveles de agua subterránea en ambos escenarios.

Cabe señalar que el incremento de los niveles del agua subterránea en un clima más húmedo puede controlarse mediante un aumento del bombeo a 1500 l/s en los pozos de SEDALIB y que en esas condiciones el nivel de agua subterránea bajo la ciudad incluso se reduciría en relación con el nivel actual. Se estima que en promedio los cambios serían de +0.74 metros para el acuífero como un todo y de -0.64 en las áreas que actualmente tienen un nivel elevado de agua subterránea (cuadro 4.3).

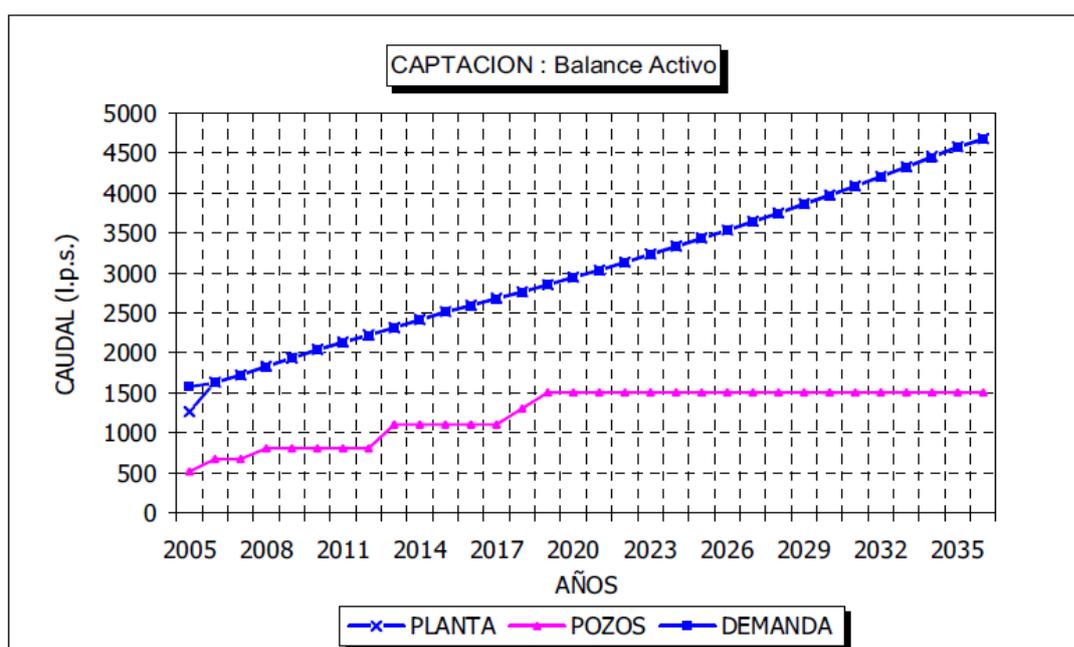


Gráfico 4.11. Incremento programado del bombeo en el acuífero para satisfacer la creciente demanda (SEDALIB 2005) (Referencia 9).

Un clima seco en el futuro, junto con un incremento de la tasa de bombeo a 1500 l/s causará una reducción del nivel de aguas subterráneas, lo cual no es sorprendente. Se prevé que, en promedio, los niveles se reducirán en 5,8 metros en el acuífero como un todo y en 4,5 metros en la sección donde el agua se encuentra a menos de cinco metros de la superficie. Cabe señalar que los nuevos niveles parecen estabilizarse dentro del período de simulación de seis años y que, por tanto, en el escenario de clima seco el aumento de las tasas de bombeo parece ser sostenible. También se observa que, aunque cerca de la costa las variaciones en el nivel de aguas son pequeñas, en esa zona los niveles previstos son muy cercanos a cero metros sobre el nivel del mar. Por consiguiente, deberá hacerse un minucioso seguimiento del nivel del agua a fin de reducir el bombeo y evitar la intrusión salina si los niveles del agua subterránea empiezan a reducirse aun más en esta zona.

Cuadro 4.3 Aumentos simulados del nivel de agua subterránea en el acuífero del Valle de Moche, de las condiciones actuales de bombeo y clima a un futuro escenario de clima seco con un volumen de bombeo de 1500 l/s . Las variaciones se indican como “máximo”, “mínimo” y “promedio” en el acuífero como un todo y en la sección del acuífero donde la distancia simulada entre el agua subterránea y la superficie es inferior a cinco metros. Las dos áreas de agregación se indican en el gráfico 4.11.

Clima futuro	Área de la muestra	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
Seco	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	-41,96	0,00	-5,76
Seco	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	-14,92	0,00	-4,46
Húmedo	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	-7,10	20,48	0,74
Húmedo	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	-2,58	1,57	-0,64

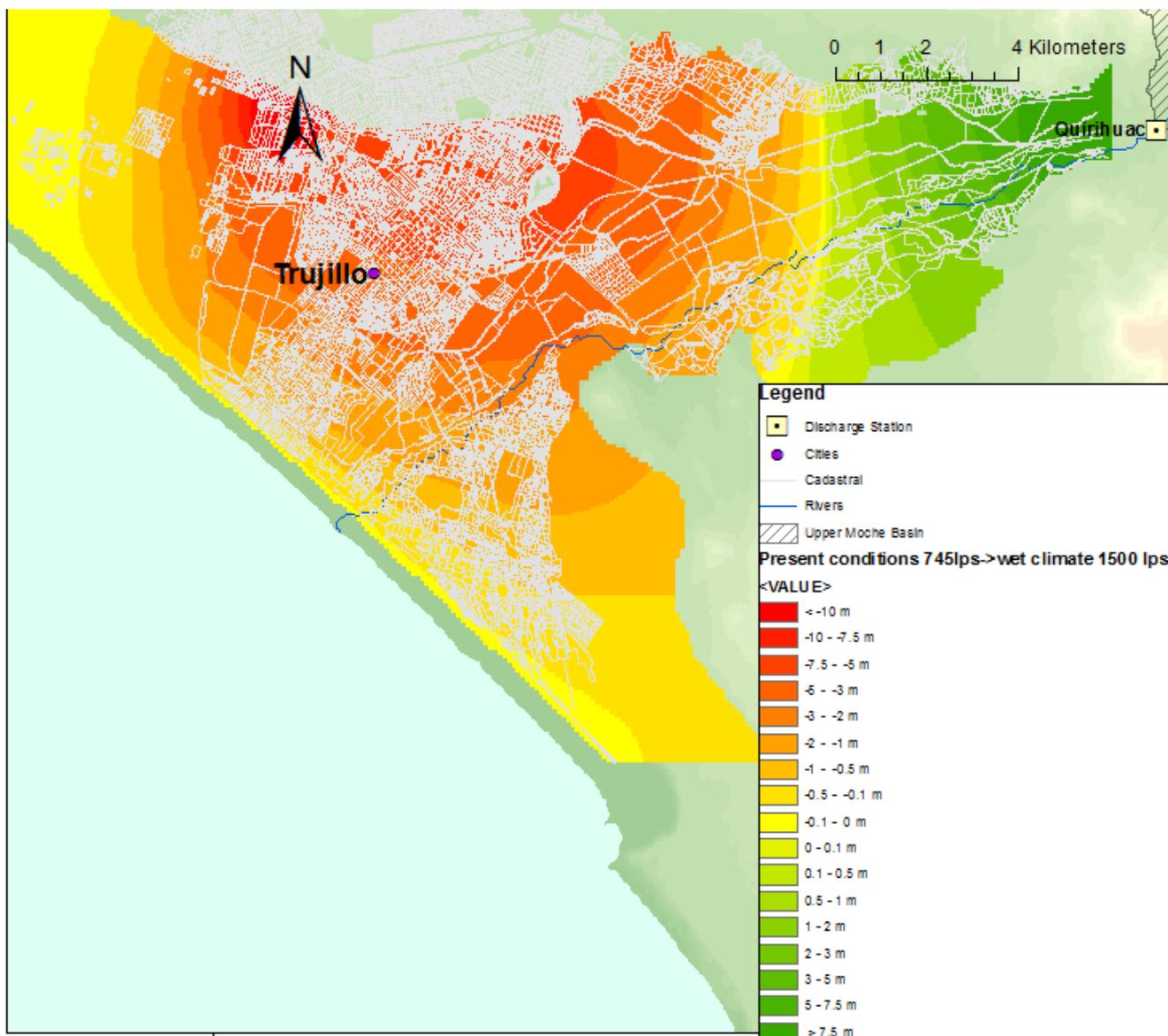


Gráfico 4.12 Cambios en la profundidad del agua subterránea (distancia de la superficie) en un clima futuro húmedo, con respecto a las condiciones actuales, si el volumen de bombeo en los pozos de SEDALIB es de 1.500 l/s.

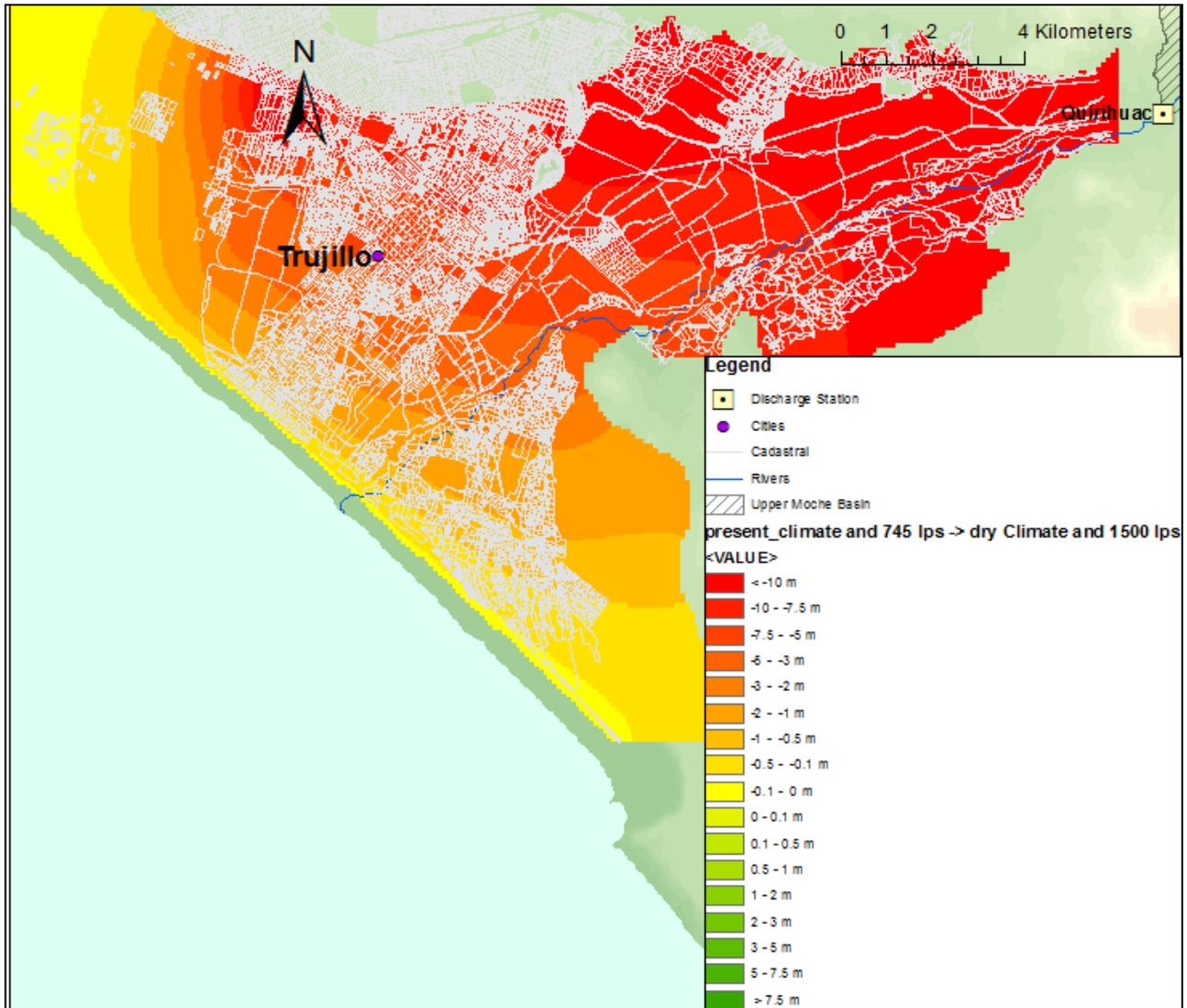


Gráfico 4.13 Cambios en la profundidad del agua subterránea (distancia de la superficie) en un clima futuro seco, con respecto a las condiciones actuales, si el volumen de bombeo en los pozos de SEDALIB es de 1.500 l/s.

## 4.2 Pronóstico del cambio climático en la Cuenca del Río Santa

En 2012 MINAM y SENAMHI, mediante el uso de modelos, efectuaron sus pronósticos y prepararon un informe sobre el cambio climático en la Cuenca del Río Santa y sus efectos en la disponibilidad de agua (Referencia 1). Dicho informe es el estudio más actualizado disponible para la zona y es la base de la información presentada en este documento. En el informe se examinan los cambios para el horizonte de 2030-2039.

Los pronósticos del cambio climático se obtuvieron mediante dos modelos de clima global usando el escenario futuro A1B de emisiones de gases de efecto invernadero. El escenario A1B se basa en supuestos de crecimiento económico rápido y lento crecimiento de la población, junto con una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes.

Se investigaron los resultados obtenidos mediante los modelos de clima MRI y NCAR. MRI es un modelo de clima global creado en Japón que tiene resolución sumamente alta (20km<sup>2</sup>) en comparación con la mayoría de los otros modelos de clima global (100km<sup>2</sup>-200km<sup>2</sup>). El modelo NCAR es resultado de una reducción dinámica de la escala del modelo climático global CCSM3, y tiene una resolución de 5km<sup>2</sup> (Referencia 1).

Existen muchas fuentes de incertidumbre en las proyecciones del cambio climático, entre ellas, los escenarios de emisión, la selección del modelo de clima y la variabilidad interna de la variable que se proyecta (la variabilidad interanual de la temperatura o la precipitación). Si bien aquí solo se analiza un escenario de emisiones de gas de efecto invernadero, los estudios sobre la incertidumbre en las proyecciones climáticas indican que, en general, en las proyecciones de más corto plazo (20 años) la selección de un escenario de emisiones no es la principal fuente de incertidumbre (gráficos 4.15 y 4.16). La principal incertidumbre para el horizonte de 2030-2039 surge de la selección del modelo climático. Si bien es preferible analizar los resultados de un gran número de modelos climáticos diferentes, esto no siempre resulta práctico. En este documento se presentan los resultados de dos modelos, aunque debe advertirse que no representan toda la escala posible de proyecciones.

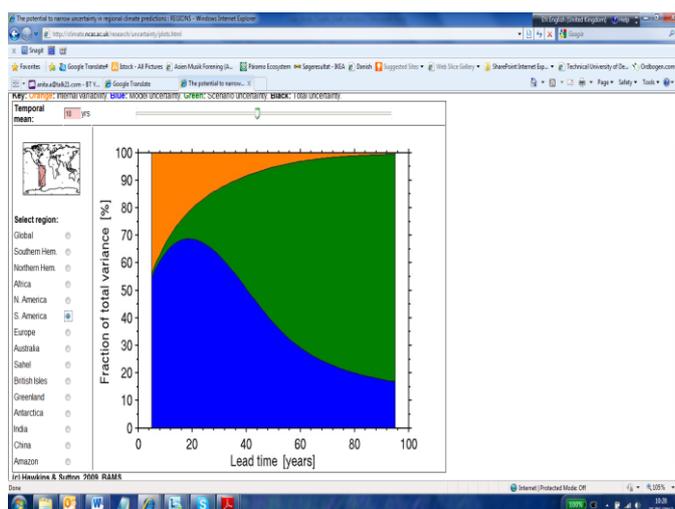


Gráfico 4.14 Importancia relativa de los factores que contribuyen a crear incertidumbre en las proyecciones a 10 años de la temperatura promedio en América del Sur. **Naranja:** variabilidad natural interna de la temperatura; **azul:** incertidumbre del modelo; **verde:** incertidumbre del escenario. La selección del modelo climático es el principal factor en el caso del horizonte de 2030-2039. Fuente: Referencia 13.

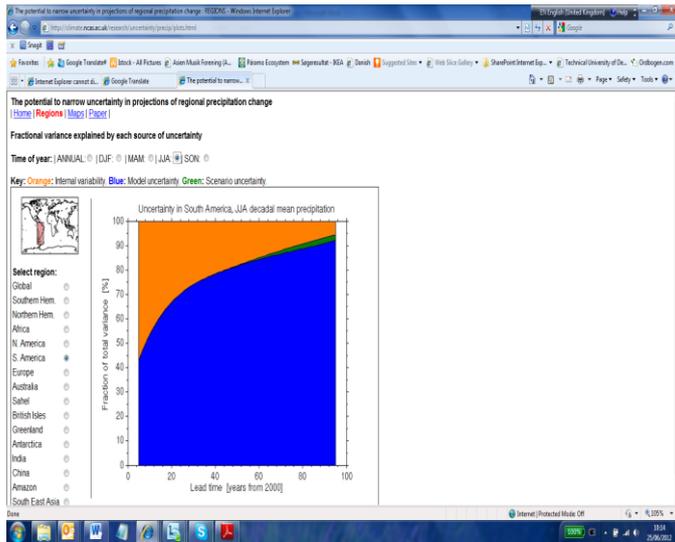


Gráfico 4.15. Importancia relativa de los factores que contribuyen a crear incertidumbre en las proyecciones sobre precipitación en junio, julio y agosto en América del Sur. **Naranja:** variabilidad natural interna de la precipitación; **azul:** incertidumbre del modelo; **verde:** incertidumbre del escenario. Las proyecciones son más susceptibles a ser afectadas por la selección del modelo climático que por la selección del escenario de emisiones. Fuente: Referencia 14.

Los cambios climáticos previstos tienen un efecto en el balance hídrico de la cuenca pues producen variaciones en la precipitación y evaporación. Los cambios en la temperatura y precipitación afectan también las zonas glaciadas y el derretimiento de los glaciares afecta a su vez el nivel de agua del río que está disponible para su transferencia al Canal Chavimochic.

#### 4.2.1 Cambios estimados en la precipitación

En lo que respecta a los cambios en la precipitación en la Cuenca del Río Santa, ambos modelos indican, en el marco del escenario A1B durante el horizonte de 2030-2039, un aumento de la lluvia en los meses más húmedos y una leve disminución en los meses más secos de julio y agosto (gráfico 4.7). Sin embargo, el modelo NCAR proyecta una disminución de la lluvia en enero y febrero. En el modelo NCAR la precipitación anual aumenta en 3,2% y en el modelo MRI en 16.1% (cuadro 4.2).

Cuadro 4.4 Cambios previstos en la lluvia caída en la Cuenca del Río Santa, según dos modelos climáticos diferentes en el marco de un escenario A1B de emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: Referencia 1.

	Santa				
	referencia (1969-89)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR
	mm	mm	mm	Δ %	Δ %
ene	121.9	150.6	112.2	23.6	-7.9
feb	138.4	169.0	136.2	22.2	-1.5
mar	149.2	173.5	168.5	16.2	12.9
abr	98.9	119.5	106.1	20.8	7.3
may	33.6	45.7	43.0	35.9	28.1
jun	12.7	18.8	18.7	47.8	46.8
jul	6.6	3.9	6.3	-40.3	-3.8
ago	12.2	10.5	11.6	-13.5	-4.9
sep	39.7	38.2	39.6	-3.8	-0.3
oct	70.1	75.2	73.4	7.3	4.7
nov	80.6	88.5	79.4	9.7	-1.5
dic	104.0	114.2	100.6	9.9	-3.3
Total	867.8	1007.6	895.6	16.1	3.2

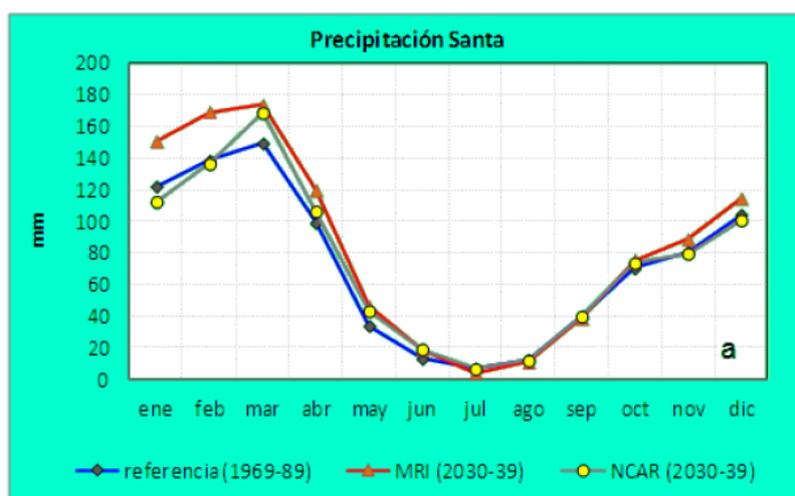


Gráfico 4.16 Cambios en la lluvia caída sobre la Cuenca del Río Santa durante el período de 2030-2039 según los modelos MRI y NCAR. (Fuente: Referencia 1).

#### 4.2.2 Cambios estimados en la temperatura

En ambos modelos climáticos se observa un aumento de la temperatura en la Cuenca del Río Santa para todos los meses (cuadro 4.3 y gráfico 4.8). Las proyecciones sobre temperatura en ambos modelos coinciden más que las proyecciones sobre precipitación. Esto es de esperar que la temperatura es más fácil de representar en un modelo que la precipitación, pues depende de menos procesos atmosféricos fundamentales.

Cuadro 4.5 Cambios en la temperatura pronosticados para la Cuenca del Río Santa en dos modelos climáticos. Fuente: Referencia 1.

	Santa				
	referencia (1969-89)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR
	°C	°C	°C	Δ °C	Δ °C
ene	12.7	13.7	13.8	0.9	1.1
feb	12.5	13.7	13.9	1.2	1.3
mar	12.4	14.0	13.6	1.7	1.2
abr	12.7	14.2	13.9	1.5	1.1
may	12.4	14.1	13.5	1.7	1.0
jun	12.0	13.3	13.0	1.3	0.9
jul	11.8	13.2	12.8	1.4	1.1
ago	12.3	13.7	13.3	1.4	1.0
sep	13.0	14.2	14.4	1.2	1.4
oct	12.9	14.4	14.3	1.4	1.4
nov	12.9	14.1	13.9	1.2	1.0
dic	13.1	14.4	14.8	1.3	1.7
Total	12.6	13.9	13.8	1.4	1.2

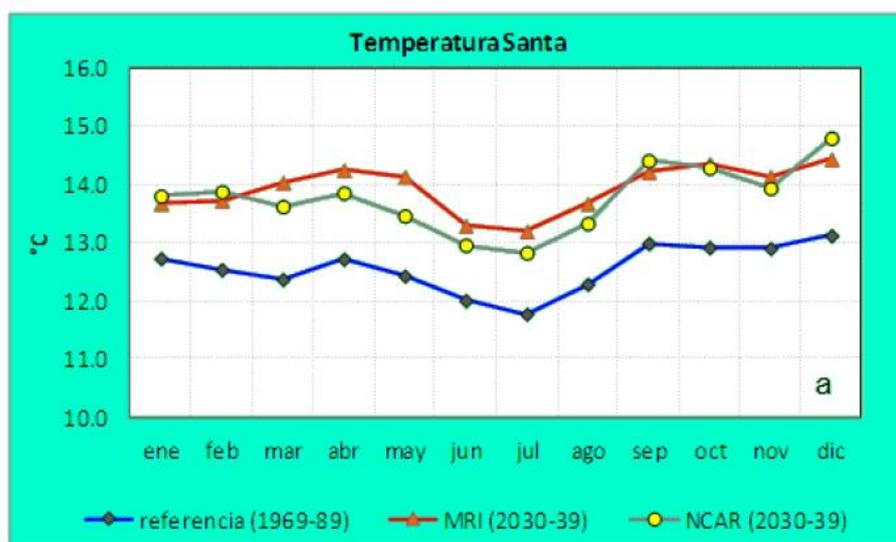


Gráfico 4.17 Temperaturas previstas en la Cuenca del Río Santa para el período de 2030-2039, comparado con el período de referencia, mediante dos modelos climáticos (MRI y NCAR) en el escenario A1B de emisiones. Fuente: Ref 1.

### 4.2.3 Cambios previstos en la disponibilidad de agua para el Canal Chavimochic

La variable de real interés para Trujillo son los cambios en la disponibilidad de agua para el Proyecto Chavimochic. Esta variable no solo depende de los cambios climáticos y sus efectos en el río sino también de los cambios en el uso del agua en la Cuenca del Santa y de los acuerdos para la distribución del agua con el Proyecto Chavimochic.

#### 4.2.3.1 Efectos en el caudal del río inducidos por el clima

Los modelos climáticos prevén un aumento de las temperaturas y un cambio en la distribución de la lluvia durante el año. Para determinar los efectos de estos cambios en el caudal del río se usó un modelo de equilibrio hídrico para simular el caudal en los escenarios futuros (Referencia 1).

Los cambios en el caudal se analizaron en Condorcerro, situado aguas arriba de la toma del Canal Chavimochic. Los resultados de ambos modelos climáticos indican un incremento del caudal todos los meses y un aumento de alrededor del 15% en los meses más secos, en relación con el período de 1969-1989 (véase el cuadro). Esto parece indicar que, para el horizonte de 2030-2039, los cambios en el caudal inducidos por el clima, de por sí, no causarán problemas para el suministro de agua del Proyecto Chavomochic.

Cuadro 4.6. Cambios previstos en el caudal del Río Santa en Condorcerro, río arriba de la toma del Canal Chavimochic. Fuente: Referencia 1.

Caudales del Río Santa en Condorcerro en el pasado y el futuro (m <sup>3</sup> /s)			
Mes	Referencia (1969-1989)	MRI (2030-2039)	NCAR (2030-2039)
Enero	207,7	248,9	227,7
Febrero	299,4	351,0	320,0
Marzo	307,4	337,1	350,6
Abril	231,8	234,8	240,2
Mayo	109,5	119,4	131,2
Junio	71,2	89,2	100,6
Julio	57,3	64,8	76,6,
Agosto	56,0	65,5	77,0
Septiembre	70,4	89,3	107,4
Octubre	99,5	138,6	142,5
Noviembre	124,8	139,7	151,9
Diciembre	162,5	218,1	205,6

## El repliegue de los glaciares

En parte, el aumento del caudal es causado por el derretimiento de los glaciares, que descarga en los ríos agua que anteriormente estaba congelada. En la Referencia 1 se señalan proyecciones del derretimiento de los glaciares y la reducción anual de la superficie cubierta por glaciares entre 2030 y 2039. Según los resultados para el año 2030 basados en las proyecciones de los modelos MRI y NCAR, la superficie glaciada es de 324,2 km<sup>2</sup> y 391,3 km<sup>2</sup>, respectivamente. Sin embargo, en el informe se señala además que en 2006 la superficie glaciada en la Cuenca del Río Santa era de 343,6 km<sup>2</sup>. Esto parece indicar que al usar las proyecciones climáticas del modelo NCAR para simular el repliegue de los glaciares el hielo no se derrite con la rapidez necesaria, pues la superficie glaciada prevista para 2030 en ese modelo es mayor (391,3km<sup>2</sup>) a la observada en 2006. Las proyecciones del modelo MRI indican una superficie glaciada más pequeña (324,2km<sup>2</sup>) en 2030 que las proyecciones del modelo NCAR, aunque no mucho menor que la superficie calculada en 2006 (343,6km<sup>2</sup>), de lo cual se deduce que en las proyecciones de ese modelo el repliegue de los glaciares tampoco es suficientemente rápido.

Cuadro 4.7 Superficie glaciada prevista en un modelo de los glaciares usando las proyecciones de los dos modelos climáticos. Véase la Referencia 1.

		Area Glaciar (Km <sup>2</sup> )										
		Referencia	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Santa	Referencia (1967)	510.2										
	MRI		324.2	319.4	314.5	309.7	304.4	299.0	295.8	292.6	289.3	284.8
	NCAR		391.3	382.8	375.9	369.2	362.6	357.4	352.3	346.9	341.9	337.2

Las proyecciones climáticas y la forma en que el cambio climático afectará la cobertura glaciar son objeto de gran incertidumbre. No obstante, incluso si los glaciares se derriten más rápido de lo previsto, en el corto plazo esto solo podría causar un aumento del caudal del río. No obstante, si los glaciares se derriten totalmente, cabría prever una disminución de los caudales, pues en tal caso no existirían reservas de agua para complementar las precipitaciones, y los caudales dependerían exclusivamente de la precipitación.

Para el período de 2030-2039, los resultados obtenidos mediante simulaciones usando los modelos climáticos MRI y NCAR apuntan a una pérdida anual de hielo de -4,4 km<sup>2</sup>/año y -6,0 km<sup>2</sup>/año, respectivamente. Si estos índices de derretimiento se aplican a la superficie glaciada observada en 2006 (de 343,6 km<sup>2</sup>), la superficie glaciada restante será de 199 km<sup>2</sup> según el modelo MRI y de 145 km<sup>2</sup> según el modelo NCAR. Puesto que estos números corresponden al 40%-60% de la superficie glaciada en 2006, no se prevé una pérdida total de superficie glaciada en el horizonte de 2012-2039.

### 4.2.4 Otros factores que afectan el caudal del río

Si bien los modelos climáticos prevén un aumento del caudal del río, esa agua no necesariamente estará disponible para el proyecto de transferencia de Chavimochic, pues otros cambios en la cuenca también podrían crear problemas para el suministro.

Se estima que la población del Perú crecerá en un 16% entre 2010 y 2025, aunque la población de Ancash probablemente aumentará en alrededor del 8% durante el mismo período (Referencia 12). Si la población de la Cuenca del Santa aumenta en alrededor del 10% para 2030 (tomando como base la población de Ancash y extrapolándola a 2030), ese incremento creará nuevas presiones sobre los recursos hídricos en la cuenca y posiblemente se traducirá en un menor caudal del río en el área de la toma de Chavimochic que el previsto en base al cambio climático.

Se prevé un aumento de alrededor del 15% del caudal en la estación seca durante el período de 2030-2039 en relación con el de 1969-1989 debido al cambio climático, aunque este incremento del caudal será contrarrestado en parte por los previstos incrementos de población. Se prevé un aumento del 19% de la población en la Provincia de Ancash durante el período similar de 1995-2025 (Referencia 12).

Cuadro 4.8 Estimaciones y proyecciones de población en Perú y la región de Ancash. (Referencia 12)

Región	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Perú	23.926.300	25.983.588	27.810.540	29.461.933	31.151.643	32.824.358	34.412.393
Departamento de Ancash	1.012.624	1.049.379	1.084.038	1.116.265	1.148.634	1.177.080	1.201.465

Junto con el aumento de la población, también podrían producirse cambios en el uso del agua en la Cuenca del Santa. El aumento de la temperatura y menor precipitación en la estación seca podría traducirse en un mayor uso del agua para fines de riego.

El desarrollo económico en la Cuenca del Santa también podría aumentar la demanda, especialmente si aumenta el desarrollo agrícola y se construyen nuevas tomas de agua corriente arriba de la actual toma de Chavimochic.

## 5 Efectos del cambio climático en la demanda de agua para riego en la zona de Trujillo

El riego es sumamente importante para la economía y el bienestar social de Trujillo. Por consiguiente, el análisis de los efectos del cambio climático en el sector es relevante.

Un examen acabado de las necesidades del sector en cuanto a suministro de agua, posibles iniciativas para ahorrar agua y posibilidades de desarrollo es, en sí, una tarea enorme que escapa al alcance de este estudio. No obstante, en esta sección se hace una evaluación global de los posibles efectos en la demanda de agua del sector en el marco de los cambios climáticos previstos hasta 2030.

La Ciudad de Trujillo está situada en una planicie prácticamente desértica. En promedio, la precipitación anual es de solo 7 mm, equivalente a menos del 1% de la evapotranspiración de referencia ( $E_t0$ ), que es de 1.070 mm (estimación de Penman-Monteith, Referencia 10). Por consiguiente, los previstos cambios en la lluvia caída (+/- 10%) no tendrán un impacto considerable en la futura demanda de agua para riego, que, por consiguiente, podría estimarse únicamente en base a los cambios en la evapotranspiración de referencia.

Como se señala en la sección 4.1.1, se prevé un aumento de entre 0,4 °C y 0,8 °C de la temperatura en la zona. Los efectos de este cambio en la evapotranspiración de referencia se indican en el gráfico 5.1 y los efectos en la demanda de agua para riego en el Proyecto Chavimochic se examinan en el cuadro 5.1. En el cuadro se observa que la fluctuación anual de la demanda sería de alrededor de +6 %. El principal cambio parece producirse en diciembre, cuando la demanda de agua para riego puede aumentar de 73,8 millones de  $m^3$  a 78,9 millones de  $m^3$ , o sea, de 27,5  $m^3/s$  a 29,5  $m^3/s$  (7%). Estas cifras provienen del “Estudio de Prefactibilidad del Proyecto Chavimochic Tercera Etapa – Primera Fase”, en que se indica, además, que el 27% de la demanda de agua para riego (de 187,5 millones de  $m^3$ ) es para nuevas áreas de regadío.

Puesto que no existen indicios de una reducción causada por el clima del caudal del Río Santa, que se prevé seguirá aumentando hasta 2039, la principal fuente de agua para riego probablemente seguirá estando disponible en el futuro. En consecuencia, los efectos del cambio climático en las tierras de regadío probablemente se limitarán a los cambios en la evapotranspiración (del 7% en el mes en que es mayor). Si ese cambio tiene lugar podría ser posible adaptarse ajustando en un 26% la prevista ampliación en la tercera etapa del proyecto. La adaptación podría hacerse también mediante una inversión en equipo para ahorrar agua o un ajuste de los sistemas de cultivo o riego. La planificación de estas medidas y la cuantificación de sus posible efectos y costos requiere un análisis pormenorizado de los distintos sistemas y prácticas de riego en la zona, que está fuera del alcance de este proyecto. En el apéndice C se indican los componentes recomendados de ese análisis.

En su actual etapa de desarrollo el Proyecto Chavimocic cuenta con abundante agua para riego. Sin embargo, esa situación podría cambiar si la zona de servicio del sistema se amplía al Valle Chicama, situado al norte del Valle de Moche. En caso de ser necesario extraer agua de los ríos Chao, Virú y Moche o de sus acuíferos para cubrir la ampliación del sistema, en los cálculos de la viabilidad del proyecto deberán tenerse en cuenta los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en estos valles. Se ha observado que el cambio climático afecta el caudal del Río Moche (sección 4.1.3), y es probable que afecte también el caudal de los ríos Chao y Virú.

En vista de la escala de las inversiones relacionadas con la ampliación, si la disponibilidad de agua es esencial para la viabilidad del proyecto deberán hacerse estimaciones más detalladas de los cambios en la precipitación y la temperatura en las cuencas. Seguidamente pueden evaluarse los efectos en los recursos locales mediante enfoques similares a los utilizados en este estudio, o las mejoras propuestas en la sección 6.1.

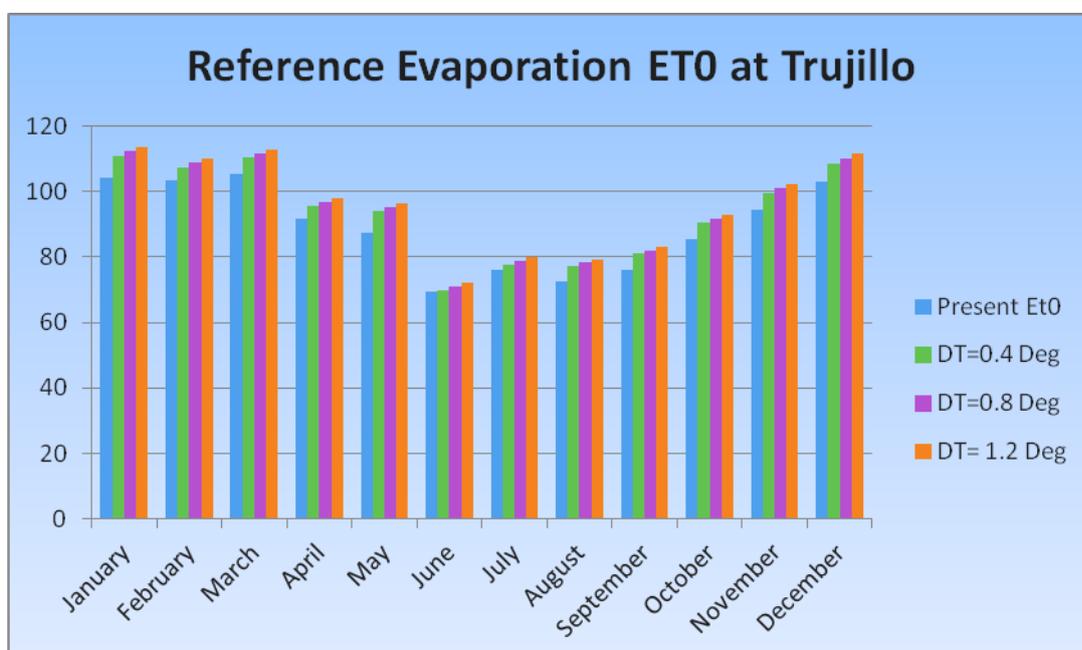


Gráfico 5.1 Cambios en la evaporación de referencia en Trujillo, calculados modificando el componente de temperatura en las estimaciones de Penman-Monteith y manteniendo los otros parámetros al nivel actual.

Cuadro 5.1 Factores del cambio calculados en la evaporación de referencia y demanda futura de agua para riego, en base a los cambios de temperatura previstos.

Cambio de temperatura (°C)	0,4	0,8	-	-	-	0,4	0,8	0.4	0.8
Variable	Et0		Demanda actual en Chavimochic *			Demanda futura		Demand Change	
Sector			Total	Hogares	Riego	Riego	Riego	Irrigation	Irrigation
Unidad	factor	factor-	Millones de m <sup>3</sup>	Millones de m <sup>3</sup>	Millones de m <sup>3</sup>	Millones de m <sup>3</sup>	Millones de m <sup>3</sup>	MCM	MCM
Enero	1,07	1,08	67,2	2,4	64,8	69,0	69,9	4.2	5.1
Febrero	1,04	1,05	61,4	2,2	59,2	61,6	62,3	2.4	3.1
Marzo	1,05	1,06	66,1	2,5	63,6	66,6	67,3	3.0	3.7
Abril	1,04	1,06	67,4	2,5	65,0	67,7	68,6	2.8	3.6
Mayo	1,07	1,09	59,6	2,5	57,1	61,4	62,2	4.3	5.1
Junio	1,01	1,02	47,3	2,3	44,9	45,3	46,0	0.4	1.1
Julio	1,02	1,03	40,6	2,4	38,2	38,9	39,5	0.8	1.3
Agosto	1,06	1,08	44,7	1,9	42,7	45,5	46,1	2.7	3.4
Septiembre	1,07	1,08	51,2	1,8	49,4	52,7	53,4	3.3	4.0
Octubre	1,06	1,07	62,6	1,9	60,6	64,2	65,0	3.5	4.4
Noviembre	1,05	1,07	74,1	2,2	71,9	75,8	76,8	3.9	4.9
Diciembre	1,05	1,07	76,1	2,3	73,8	77,8	<b>78,9</b>	4.0	<b>5.1</b>
<b>Anual</b>	<b>1,05</b>	<b>1,06</b>	<b>718,2</b>	<b>27,0</b>	<b>691,2</b>	<b>726,5</b>	<b>736,1</b>	<b>35.3</b>	<b>44.8</b>

\* Fuente: Chavimochic. Explotación de aguas subterráneas en los valles de Chao, Virú y Moche, Proyecto Chavimochic, Región de La Libertad (Referencia 11). Estudio de Prefactibilidad del Proyecto Chavimochic, Tercera Etapa – Primera Fase.

## 6 El proceso de adaptación

En las secciones anteriores queda claramente establecido que, en la actualidad, el pronóstico de los efectos del cambio climático en el suministro de agua de Trujillo, los niveles de agua subterránea en el acuífero del Valle de Moche y el abastecimiento de agua para el Canal Chavimochic presenta grandes incertidumbres. En el caso del acuífero, los dos escenarios de clima analizados apuntan incluso en direcciones opuestas. Por tanto, podrían ponerse en duda la viabilidad y hasta la relevancia de ciertas medidas de adaptación.

En particular, cuando las incertidumbres son apreciables, es importante que, sin trabar el proceso de adaptación, se inicien actividades orientadas a abordar y reducir esa incertidumbre y, seguidamente, se continúe el proceso de adaptación con información más fiable.

No obstante, puesto que la adopción de ciertas medidas de adaptación podría tomar mucho tiempo, puede resultar inaceptable posponer la decisión de implementarlas. En el Programa de Impacto Climático del Reino Unido (UKCIP) se propone un enfoque en etapas -pero cíclico- para la labor de planificación, como se indica en el gráfico 6.1. Para evitar las trabas en el proceso es importante especificar, desde el comienzo, escenarios que son beneficiosos para todas las partes y medidas que más adelante no es necesario lamentar, o sea, situaciones que no solo beneficiarán al sistema mediante la adaptación al clima y que son favorables independientemente de la evolución del clima. Por consiguiente, las medidas de adaptación que se esbozan más adelante están centradas en estudios orientados a reducir la incertidumbre, situaciones que benefician a todas las partes y medidas sin consecuencias que puedan lamentarse.

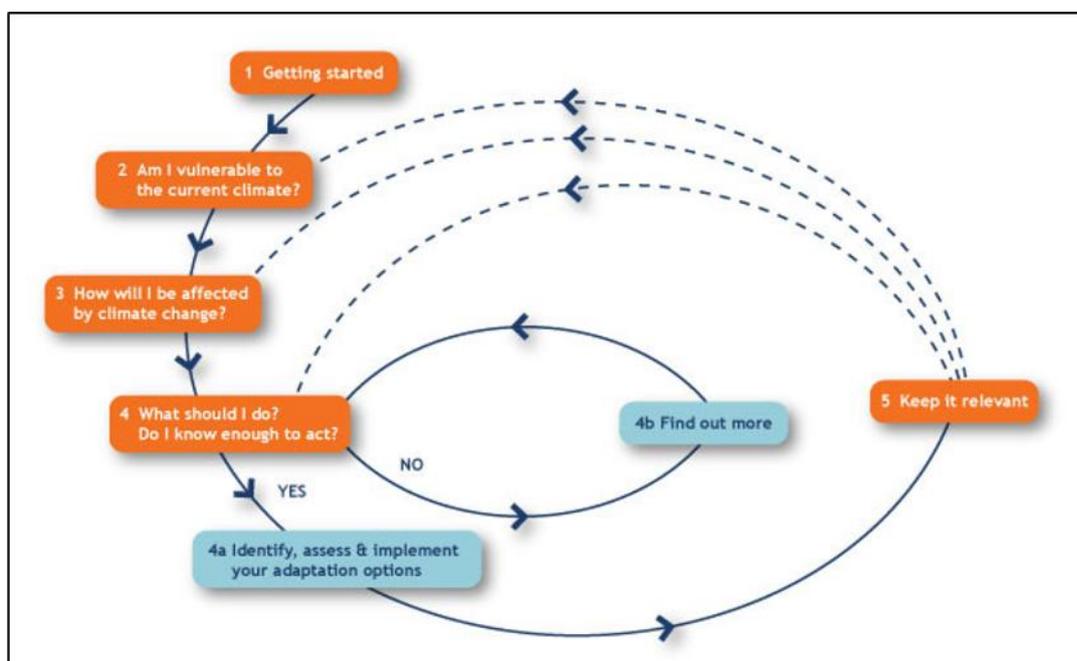


Gráfico 6.1 La Guía de adaptación (Adaptation Wizard) del UKCIP y UKCIP 2.0., Oxford (UKCIP, 2008).

## 6.1 Posibles medidas de adaptación

Se ha especificado un grupo preliminar de opciones de adaptación. Las distintas opciones se han evaluado subjetivamente en una matriz de preselección y se han categorizado para crear un plan de adaptación en líneas generales.

Cabe señalar que la lista de opciones es preliminar y que la elaboración de una lista final, y su categorización, es un proceso detallado más largo que escapa al alcance de este estudio. El plan de adaptación deberá someterse a nuevo examen cuando se disponga de pronósticos o datos más detallados del cambio climático en la zona o cuando los cambios en la demanda prevista lo hagan necesario. A este respecto, el proceso de adaptación al cambio climático no es diferente de la planificación normal de recursos hídricos o la gestión de abastecimiento de agua.

La lista preliminar de opciones y su categorización se incluyen aquí para servir como referencia y podrían facilitar el inicio del proceso de adaptación al cambio del clima y la elaboración de un plan de adaptación al cambio climático.

### **Se han especificado las siguientes medidas de adaptación:**

#### **General**

- 1 No adoptar medidas. Si bien el análisis hecho en este estudio de caso no pone al descubierto vulnerabilidades alarmantes frente a los efectos del cambio climático, la incertidumbre frente a los posibles cambios sigue siendo tal que la situación deberá, al menos, ser objeto de un seguimiento intensivo y más estudio.
- 2 Iniciar evaluaciones minuciosas del cambio climático en la Cuenca del Río Moche y las zonas adyacentes a tono con la labor efectuada en la Cuenca del Río Santa. El objetivo es reducir la considerable incertidumbre de los pronósticos climáticos como requisito mínimo para limitar el impacto a una reducción o un aumento del caudal en la Estación de Quirihuac. Esta labor deberá incluir el uso de varios modelos meteorológicos y una reducción dinámica de la escala a fin de disminuir la incertidumbre de los pronósticos climáticos para limitar el impacto a una reducción o un aumento del caudal en la Estación de Quirihuac.
- 3 Constituir un equipo a cargo de modelar el sistema de aguas subterráneas para conducir estudios más detallados de la interacción entre el agua subterránea y el agua de superficie en el acuífero del Río Moche. La labor del equipo deberá facultar a las autoridades de Trujillo y Chavimochic para actuar con diligencia frente a los posibles cambios en el clima y la modalidad de bombeo en el acuífero, a fin de mejorar las medidas para combatir la congestión de drenajes sin crear el riesgo de un bombeo excesivo, en particular a lo largo de la costa. El equipo deberá crear un instrumento de respaldo a las decisiones relacionadas con el agua subterránea que tenga mayor capacidad para representar con modelos las variaciones estacionales de la entrada y el uso de agua para riego, la influencia de las afluencias en el acuífero, la posible intrusión salina y los efectos del cambio en la modalidad de bombeo, y para evaluar la calidad del agua subterránea. El instrumento

deberá calibrarse prestando especial atención a la profundidad del plano freático.

### **Adaptación a un clima más seco.**

- 4 Efectuar estudios de simulación minuciosos para determinar con más exactitud los niveles sostenibles de bombeo en el acuífero. La evaluación rápida hecha en este estudio indica que el programado incremento de las tasas de bombeo hasta 2018 parece ser sostenible en el contexto del clima más seco previsto, aunque esto debe confirmarse con nuevos estudios. Con esta labor se abordarán los problemas de la escasez de agua debido al cambio climático y la congestión de drenajes. Todas las partes se benefician.
- 5 Adoptar iniciativas de gestión de la demanda destinadas a reducir la demanda neta mediante políticas de fijación de precios o restricciones en el uso del agua. Los escenarios de bombeo programados solo permiten satisfacer la demanda hasta 2020.
- 6 Reducir la demanda bruta minimizando las pérdidas en el sistema de distribución (reducción de la presión o tareas de reemplazo).
- 7 Verificar los niveles de agua subterránea en el acuífero, especialmente a lo largo de la costa para activar sistemas de advertencia frente a una posible extracción excesiva y modificar la modalidad de bombeo según sea necesario.
- 8 Negociar opciones para aumentar el suministro de agua para consumo doméstico desde el Canal Chavimochic si los nuevos estudios apuntan a un escenario climático más seco que el pronosticado en este estudio o si se determina que las tasas de bombeo previstas son insostenibles.
- 9 Empezar a prepararse para un aumento de la demanda de agua para riego. Si bien la estimación del incremento anual de un 6% de la demanda y del 7% durante el mes de más actividad (diciembre) no parecer ser motivo de alarma, el pronóstico del aumento de temperatura (la causa del aumento de la demanda) es más fiable que los pronósticos sobre precipitación que dominan las previstas fluctuaciones del caudal de los ríos locales. Puesto que el Proyecto Chavimochic no está totalmente terminado, sigue teniendo un excedente de recursos hídricos para acomodarse a esos cambios. No obstante, si se programa una mayor expansión, los pronósticos deben depurarse y reconsiderarse, o compensarse con ahorros de agua o cambios en las modalidades de cosecha.
- 10 Incrementar la extracción de agua del Canal Chavimochic y la capacidad de la planta de tratamiento si los nuevos estudios del escenario de bombeo en 2018 indican que es insostenible. Se propone un aumento de 750 l/s para compensar la diferencia entre el nivel de bombeo actual y las propuestas tasas de bombeo para el futuro.

## **Adaptación a un clima más húmedo**

- 11 Efectuar estudios más detallados de la interacción entre las aguas subterráneas y el agua de superficie en el acuífero del Río a fin de confirmar las conclusiones de este estudio y programar futuras medidas para reducir la congestión de drenajes.
- 12 Aumentar el bombeo de SEDALIB al nivel programado de 1500 l/s y, si la calidad del agua lo permite, usarla para abastecer la ciudad. El escenario de bombeo estudiado en las secciones anteriores parece contrarrestar los efectos negativos de un clima más húmedo.
- 13 Aumentar el bombeo para riego en el Valle, como lo propone Chavimochic en el escenario 3 del estudio anterior (Referencia 6).
- 14 Restringir el riego en ciertas zonas del Valle. Si la congestión de drenajes no puede controlarse con otras medidas podría ser necesario restringir el riego en algunas secciones del Valle a cultivos con menor consumo de agua y menos filtración.
- 15 Investigar las oportunidades para seguir ampliando los programas de desarrollo del Proyecto Chavimochic posibilitados por una mayor disponibilidad de agua.
- 16 Extraer agua del río para exportarla fuera de la Cuenca. Esto podría ayudar a reducir la congestión de drenajes, aunque en esta área se necesita más investigación y cuantificación.

## **6.2 Matriz de preselección**

Todas las medidas posibles de adaptación se incorporan en la matriz de preselección y se someten a una evaluación inicial basada en la información disponible y las condiciones específicas del terreno. Esta es una evaluación cualitativa en que todas las cifras se evalúan en base a las siguientes factores que han de considerarse:

- Todas las partes se benefician
- Con/Sin consecuencias que pueden lamentarse
- Flexibilidad
- Mejora de la capacidad de adaptación
- Urgencia
- Aceptabilidad en el ámbito político
- Costo

Las evaluaciones se complementan con “puntos”, que van de “+ + +” para el puntaje más alto, a “0” cuando la calificación es neutral, y a “- - -”, que es la califica-

ción más baja. Los puntajes positivos y negativos se recopilan por separado, para obtener los siguientes resultados:

- Puntaje positivo alto = alta prioridad de implementación
- Puntaje negativo alto = alto nivel de controversia, costo elevado o, de no ser así, una medida de eficacia dudosa

Las medidas actualmente evaluadas, las pautas de evaluación y los puntajes efectivos podrían estar incompletos y no ser reflejo fiel ni totalmente objetivo de la situación. Por consiguiente, la matriz de preselección debe actualizarse o ampliarse adecuadamente mediante la participación activa de todas las partes interesadas.

ID	Medida de adaptación	Todos se benefician	Con/Sin Consecuencias que pueden lamentarse	Flexibilidad	Capacidad de adaptación	Urgencia	Aceptabilidad desde el punto de vista político	Costo	Puntaje	Categoría
	<b>General</b>									
0	Ninguna medida.	--- Nadie se beneficia.	-- La adopción de algunas medidas toma tiempo. No se adoptan medidas que puedan lamentarse.	-- En este caso la espera no aumentará la flexibilidad de las medidas en el futuro.	-- La vulnerabilidad aumenta si no se hace nada.	0 No relevante.	-- En general, no abordar los problemas reconocidos no es una buena estrategia de política.	-- La inexistencia de costos ahora puede culminar en mayores costos en el futuro.	0+/12 -	-
1.1	Hacer una evaluación detallada del cambio climático en la Cuenca del Río Moche y las zonas adyacentes.	++ Mejores posibilidades de calibración de los modelos meteorológicos e hidrológicos. Más conocimiento para diseñar nuevas estructuras.	++ La ampliación del conocimiento siempre es beneficiosa.	++ Dará lugar a nuevas ideas sobre adaptación.	0 De por sí no aumentará la capacidad de adaptación.	+++ Reviste urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	++ Es aceptable desde el punto de vista político.	+++ Bajo costo.	+14/-0	1

1. 2	Constituir un equipo a cargo de aplicar modelos del sistema de aguas subterráneas	++ Aumenta la adaptación al clima seco y al clima húmedo. Se deja constancia de las medidas de adaptación.	++ La ampliación del conocimiento siempre es beneficiosa.	++ Dará lugar a nuevas ideas sobre adaptación	++ Aumentará la capacidad de adaptación y permitirá abordar mejor los problemas.	+ Reviste urgencia para el proceso de adopción de decisiones .	+++ Es aceptable desde el punto de vista político.	+ Costos más bien bajos.	13+/- 0	2
	<b>Adaptación a un clima más seco</b>									
2. 1	Hacer una evaluación más detallada del bombeo sostenible.	++ Protección del acuífero, suministro para la ciudad y combate contra la congestión de drenajes.	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse.	++ Facilitará la adopción de decisiones en lugar de obstaculizarla.	0 De por sí no aumentará la capacidad de adaptación.	+ Reviste cierta urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	++ Es aceptable desde el punto de vista político.	++ Bajo costo.	11+/ 0 -	3

2.2	Adoptar medidas de gestión orientadas a reducir la demanda neta mediante fijación de precios o restricción del consumo de agua.	++ Reduce la necesidad de bombeo o inversión en tratamiento de agua de superficie para satisfacer aumento de la demanda.	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse El ahorro es siempre bueno.	++ Puede implementarse y modificarse en cualquier momento pero necesita tiempo para funcionar.	0 De por sí no aumentará la capacidad de adaptación.	+ Puede implementarse en cualquier momento pero es preferible no esperar mucho.	-- Podría ser delicado desde el punto de vista político.	++ Bajo costo.	9+/2-	8
2.3	Reducir la demanda bruta minimizando las pérdidas en el sistema de distribución.	++ Mejora la disponibilidad de agua y reduce los costos de explotación.	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse El ahorro es siempre bueno.	++ La implementación puede iniciarse en cualquier momento.	+ Un sistema de distribución eficaz es más adaptable.	+ Puede implementarse en cualquier momento pero es preferible no esperar mucho.	+ No es delicado desde el punto de vista político.	-- Costo más bien elevado.	10+/2- -	7

2.4	<i>Observar los niveles de agua subterránea en el acuífero.</i>	+ Provechoso en cuanto a congestión de drenajes y sostenibilidad del bombeo.	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse.	++ La implementación puede iniciarse en cualquier momento.	+ Podría mejorar la capacidad de adaptación al aumentar el bombeo .	+ Reviste cierta urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	+ No es delicado desde el punto de vista político.	+ Costo más bien bajo.	9+/0-	6
2.5	Negociar opciones para aumentar el suministro de agua de Chavimochic para uso en los hogares.	0	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse.	++ La implementación puede iniciarse en cualquier momento.	+ Aumenta la flexibilidad de los recursos.	+ Reviste cierta urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	++ Es aceptable desde el punto de vista político.	++ Bajo costo.	10+(0-)	4

2.6	Iniciar planes para afrontar el aumento de la demanda de agua para riego.	0	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse.	++ La implementación puede iniciarse en cualquier momento.	+ Deberá incrementar la capacidad de adaptación de los sistemas de riego.	+ Reviste cierta urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	++ Es aceptable desde el punto de vista político.	++ Bajo costo.	10+/0 -	5
2.7	Aumentar la extracción en el Canal Chavimoch y la capacidad de la planta de tratamiento.	0 Solo afecta el suministro de agua.	0 Podría tener consecuencias negativas si los pronósticos de clima son demasiado conservadores.	+ La implementación toma tiempo y no deberá iniciarse antes de contar con información más sólida sobre el clima y las tasas sostenibles de bombeo	++ Aumenta la capacidad de adaptación de los sistemas de riego.	0 No reviste gran urgencia.	++ Es aceptable desde el punto de vista político.	- - Costo elevado.	5+/2-	9
	<b>Adaptación a un clima más húmedo</b>									

3.1	Efectuar estudios más detallados de la interacción entre las aguas subterráneas y el agua de superficie en el acuífero del Río Moche.	+ Facilita la adaptación a un clima más seco y a un clima más húmedo.	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse.	++ La implementación puede iniciarse en cualquier momento.	+ Deberá traducirse en mayor capacidad de adaptación.	+ Reviste cierta urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	++ Es aceptable desde el punto de vista político.	+ Bajo costo.	10+/0-	3
3.2	Aumentar el bombeo de SEDALIB al nivel programado de 1500 l/s.	++ Mejora la disponibilidad de agua y reduce la congestión de drenajes.	++ Sin consecuencias que pueden lamentarse.	+ La implementación gradual puede iniciarse en cualquier momento.	++ Aumenta la flexibilidad de los recursos.	0 Puede implementarse en cualquier momento pero a más tardar cuando lo requiera la demanda.	++ No es delicado desde el punto de vista político.	- - Costo elevado.	9+/2-	5
3.3	Aumentar el bombeo para riego en el Valle.	++ Mejora la disponibilidad de agua y reduce la congestión de drenajes.	++ Sin consecuencias lamentables.	+ La implementación gradual puede iniciarse en cualquier momento.	++ Aumenta la flexibilidad de los recursos.	+ Reviste cierta urgencia	- Podría ser delicado desde el punto de vista político	- - Costo elevado.	8+/3-	6

3.4	<i>Restringir el riego en ciertas secciones del Valle.</i>	0 No todos se benefician.	0 Podría tener consecuencias que pueden lamentarse.	+	Bastante flexible.	0 De por sí no aumenta la capacidad de adaptación.	0 No reviste urgencia.	-- Delicado desde el punto de vista político.	Podría tener alto costo.	1+/3-	8						
3.5	Investigar las oportunidades para aumentar el riego.	+	Beneficia principalmente al sector de riego pero también fomenta el desarrollo general de la zona.	++	Sin consecuencias que pueden lamentarse.	++	La implementación puede iniciarse en cualquier momento.	0	+	Reviste cierta urgencia para el proceso de adopción de decisiones.	++	Es aceptable desde el punto de vista político.	+	Bajo costo.	9+/0-	4	
3.6	Extraer agua del río para exportarla fuera de la cuenca.	++	Reduce la congestión de drenajes y fomenta el riego en otras zonas.	0	Depende de los pronósticos del clima.	+	Se necesitan nuevos estudios.	++	Flexibilidad Aumenta la capacidad de regulación.	0	No reviste urgencia.	+	Es aceptable desde el punto de vista político.	--	Costo elevado.	5+/2-	7

ID	Medida de adaptación	Todos se benefician	Con/Sin Consecuencias que pueden lamentarse	Flexibilidad	Capacidad de adaptación	Urgencia	Aceptabilidad desde el punto de vista político	Costo	Puntaje	Categoría
	<b>Fuentes complementarias</b>									
10	Ampliación Ríos Orientales.	+++ Todos se benefician. Promueve la disponibilidad de agua, reduce el riesgo de las corrientes de barro (destrucción de ductos) y produce energía.	+ Sin consecuencias negativas. Este proyecto parece ser necesario incluso sin considerar el cambio climático. No obstante, es difícil desde el punto de vista técnico y requiere grandes inversiones. Podría tener consecuencias que pueden lamentarse.	- - No ofrece mucha flexibilidad.	+++ Mejora la capacidad de adaptarse en caso de erupciones volcánicas (corrientes de barro).	+ Reviste cierta urgencia .	++ No es delicado desde el punto de vista político.	- - Costo elevado.	10+/4-	9

## 7 Plan esquemático de adaptación

Las opciones delimitadas se han organizado en orden de prioridad de acuerdo con la calificación dada en la matriz de preselección. El plan esquemático debe examinarse con las autoridades de la Ciudad de Trujillo, SEDALIB y el Proyecto Chavimochic, quienes deberán analizarlo detenidamente antes de su implementación.

La lista preliminar categorizada de medidas se dividió en tres secciones, de las cuales las últimas dos, “adaptation a un clima más seco” y “adaptación a un clima más húmedo”, se califican paralelamente.

### 7.1 Medidas generales de adaptación

- 1.1 Deberá iniciarse una evaluación detallada del cambio climático en la Cuenca del Río Moche y las zonas adyacentes en armonía con la labor realizada en la Cuenca del Río Santa. El objetivo es reducir la considerable incertidumbre de los pronósticos del clima como requisito mínimo para limitar el impacto a una reducción o un aumento del caudal en la Estación de Quirihuac. Esta labor deberá incluir varios modelos meteorológicos y una reducción dinámica de la escala a fin de disminuir la incertidumbre de los pronósticos climáticos, como requisito mínimo para limitar el impacto a una reducción o un aumento del caudal en la estación de Quirihuac.
- 1.2 La creación de un equipo a cargo de modelos para efectuar estudios más detallados de la interacción entre las aguas subterráneas y el agua de superficie en el acuífero del Moche. El equipo deberá habilitar a las autoridades de Trujillo y del Proyecto Chavimochic para actuar eficazmente frente a los posibles cambios del clima y las modalidades de bombeo en el acuífero, procurando mejorar las medidas para combatir la congestión de drenajes sin el riesgo de un bombeo excesivo, sobre todo a lo largo de la costa. El equipo deberá crear un instrumento de respaldo para la adopción de decisiones sobre aguas subterráneas con ampliada capacidad para modelar a fin de simular las variaciones estacionales de las afluencias y su aplicación en el riego, simular mejor la influencia de las afluencias en el acuífero, la posible intrusión salina y los efectos de las variaciones en el bombeo, y para evaluar la calidad del agua subterránea. El instrumento deberá calibrarse prestando especial atención a la profundidad de la capa freática.

### 7.2 Adaptación a un clima más seco

- 2.1 Efectuar estudios de simulación minuciosos para determinar con más exactitud los niveles sostenibles de bombeo en el acuífero. La evaluación rápida hecha en este estudio parece indicar que el programado incre-

mento de las tasas de bombeo hasta 2018 es sostenible en el contexto del clima más seco previsto, aunque esto debe confirmarse con nuevos estudios. Con esta labor se abordarán los problemas de la escasez de agua debido al cambio climático y la congestión de drenajes. Esta es una opción de bajo costo que beneficia a todas las partes y que no tiene consecuencias que más adelante puedan lamentarse.

- 2.2 Negociar opciones para aumentar el suministro de agua para consumo doméstico desde el Canal Chavimochic si los nuevos estudios apuntan a un escenario climático más seco que el pronosticado en este estudio o si se determina que las tasas de bombeo previstas son insostenibles. Esta es una opción de bajo costo que puede iniciarse en cualquier momento, beneficia a todas las partes y no tiene consecuencias que más adelante puedan lamentarse.
- 2.3 Empezar a prepararse para un aumento de la demanda de agua para riego. Si bien la estimación del incremento anual de un 6% de la demanda y del 7% durante el mes de más actividad (diciembre) no parecer ser motivo de alarma, el pronóstico del aumento de temperatura (la causa del aumento de la demanda) es más fiable que los pronósticos sobre precipitación que dominan las previstas fluctuaciones del caudal de los ríos locales. Puesto que el Proyecto Chavimochic no está totalmente terminado, sigue teniendo un excedente de recursos hídricos para acomodarse a esos cambios. No obstante, si se programa una mayor expansión, los pronósticos deben depurarse y considerarse, o compensarse con ahorros de agua o cambios en las modalidades de cosecha. Esta es una opción de bajo costo que puede iniciarse en cualquier momento, beneficia a todas las partes, no tiene consecuencias que más adelante puedan lamentarse y aumenta la capacidad de adaptación.
- 2.4 Verificar los niveles de agua subterránea en el acuífero, especialmente a lo largo de la costa para activar sistemas de advertencia frente a una posible extracción excesiva y modificar la modalidad de bombeo según sea necesario. Esta es una opción de bajo costo que puede iniciarse en cualquier momento, beneficia a todas las partes, no tiene consecuencias que más adelante puedan lamentarse y aumenta la capacidad de adaptación.
- 2.5 Reducir la demanda bruta minimizando las pérdidas en el sistema de distribución (reducción de la presión o tareas de reemplazo). Esta es una opción de bajo costo que puede iniciarse en cualquier momento, beneficia a todas las partes y no tiene consecuencias que más adelante puedan lamentarse. No obstante, el costo podría ser elevado.
- 2.6 Adoptar iniciativas de gestión de la demanda destinadas a reducir la demanda neta mediante políticas de fijación de precios o restricciones en el uso del agua. Los escenarios de bombeo programados solo permiten satisfacer la demanda hasta 2020. Esta es una opción de bajo costo que puede iniciarse en cualquier momento, beneficia a todas las partes, no tiene consecuencias que más adelante puedan lamentarse y aumenta la capacidad de adaptación. Sin embargo, los resultados podrían tomar tiempo y puede ser delicada desde el punto de vista político.
- 2.7 Incrementar la extracción de agua del Canal Chavimochic y la capacidad de la planta de tratamiento si los nuevos estudios del escenario de bombeo en 2018 indican que es insostenible. Se propone un aumento de 750 l/s para compensar la diferencia entre el nivel de bombeo actual y las propuestas tasas de bombeo para el futuro. Podrían surgir

consecuencias lamentables y el costo es alto, aunque en el largo plazo podría ser necesaria.

### **7.3 Adaptación a un clima más húmedo**

- 3.1 Efectuar estudios más detallados de la interacción entre las aguas subterráneas y el agua de superficie en el acuífero del Valle de Moche para confirmar las conclusiones de este estudio y planificar una mayor reducción de la congestión de los drenajes.
- 3.2 Investigar las oportunidades para seguir ampliando los programas de desarrollo del Proyecto Chavimochic posibilitados por una mayor disponibilidad de agua.
- 3.3 Aumentar el bombeo de SEDALIB al nivel programado de 1500 l/s y, si la calidad del agua lo permite, usarla para abastecer la ciudad. El escenario de bombeo estudiado en las secciones anteriores parece contrarrestar los efectos negativos de un clima más húmedo.
- 3.4 Aumentar el bombeo para riego en el Valle, como lo propone Chavimochic en el escenario 3 del estudio anterior (Referencia 6).
- 3.5 Extraer agua del río para exportarla fuera de la Cuenca. Esto podría ayudar a reducir la congestión de drenajes, aunque en esta área se necesita más investigación y cuantificación.
- 3.6 Restringir el riego en ciertas zonas del Valle. Si la congestión de drenajes no puede controlarse con otras medidas podría ser necesario restringir el riego en algunas secciones del Valle a cultivos con menor consumo de agua y menos filtración.

## 8 Referencias

- Referencia 1. Ministerio del Ambiente, SENAMHI (2012), “Disponibilidad hídrica superficial en las cuencas de los ríos Santa, Rimac y Mantaro bajo contexto de cambio climático para el horizonte 2030-2039”.
- Referencia 2. Ministerio del Ambiente, SENAMHI (2009), Escenarios del cambio climático en el Perú al 2030, Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, Resumen.
- Referencia 3. Ministerio del Ambiente, SENAMHI (2010), Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- Referencia 4. MIKE BY DHI (2011), MIKE 11, “A Modelling System for Rivers and Channels”, Manual de referencia.
- Referencia 5. SEDALIB ( 2005), Plan Maestro Optimizado 2005-2035
- Referencia 6. Chavimochic (2008?), Proyecto especial de Chavimochic, Modelo Matemático de Simulación del Acuífero Moche.
- Referencia 7. VisualModflow(2012):  
<http://www.swstechnology.com/groundwater-modeling-software/visual-modflow-flex>
- Referencia 8. SEDALIB, 2012, Plan Maestro Optimizado, EPS SEDALIB S.A., Período de 2012 -2042.
- Referencia 9. SEDALIB, (2005), Plan Maestro Optimizado, 2005-2035.
- Referencia 10. FAO, 2005, Climwat 2.0 for Cropwat.
- Referencia 11. Chavimochic (200?), Explotación de Aguas Subterráneas en los Valles de Chao, Viru y Moche, Proyecto Chavimochic, Región de La Libertad.
- Referencia 12. INEI, 2010, Estimaciones y proyecciones de población por departamento, sexo y grupos quinquenales de edad, 1995-2025, Boletín de análisis demográfico No. 37. <http://www.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0846/index.htm> Accessed 22/06/2012.
- Referencia 13. Hawkins, Ed., Rowan Sutton, 2009, The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions, Boletín de la Sociedad Estadounidense de Meteorología, 90, 1095–1107. <http://dx.doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>

Referencia 14. Hawkins, Ed, Rowan Sutton, 2011, The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 2011, volumen 37, números 1-2, págs 407-418.

Referencia 15. BID, 2012, estudios de casos de adaptación al cambio climático.

## APÉNDICES

## **A P É N D I C E A**

Modelos de la escorrentía y el cambio climático en la Cuenca alta del Río Moche

## **A P É N D I C E B**

Efectos del cambio climático en el acuífero del Río Moche

## **A P É N D I C E C**

Adaptación al cambio climático en el sector de riego  
Componentes propuestos del programa

## A. Efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche

### Índice

#### A. Efectos del cambio climático en el caudal del Río Moche

##### Índice

A.1	Introducción
A.2	Constitución del modelo NAM de escorrentía de lluvia para la Cuenca alta del Río Moche
A.2.1	Calibración del modelo
A.3	Simulación de los efectos del cambio climático
A.4	Referencias

#### A.1 Introducción

Con el fin de analizar las posibles consecuencias del cambio climático en el caudal del Río Moche, se ha constituido y calibrado un modelo conceptual de escorrentía -el modelo NAM- en la Cuenca del río aguas arriba de la estación de medición de caudales de Quirihuac (véase el gráfico A.5). Esta cuenca tiene una superficie total de 1.830 km<sup>2</sup> y una elevación promedio de 2.680 metros sobre el nivel del mar.

#### A.2 Constitución del modelo de escorrentía NAM para la Cuenca alta del Río Moche

El modelo NAM es uno entre varios modelos de escorrentía del sistema MIKE 11 de modelos fluviales. El modelo permite simular el proceso de escorrentía en una zona de captación a escala de la cuenca y representar los distintos componentes del proceso mediante una representación continua del contenido hídrico en cuatro reservas distintas relacionadas entre sí. Las cuatro reservas representan distintos componentes físicos de la cuenca. El modelo NAM puede caracterizarse como un modelo determinístico, agregado y conceptual con pocos requisitos de entrada de datos. Los modelos HBV, Stanford y Sacramento, junto con muchos otros, pertenecen a la misma familia. Estos modelos son instrumentos poderosos para evaluar los efectos del cambio en los parámetros climáticos. Este modelo se seleccionó dada su demostrada capacidad para simular variaciones climáticas a más corto plazo (por ejemplo, una serie de años secos y húmedos), que hace posible simular los cambios climáticos previstos en la Cuenca del Río Moche. El modelo NAM es un instrumento técnico probado que se ha usado en numerosas zonas de captación en todo el mundo, con diversos regímenes hidrológicos y climáticos. En Perú se ha aplicado con éxito para simular las condiciones existentes en las cuencas de Mantaro, Chaglla y Marañón. La Referencia 4 contiene información más detallada sobre el modelo y su aplicación.

Durante el período de calibración del modelo se usaron los datos históricos periódicos ponderados obtenidos en las cinco estaciones de medición de la lluvia caída indicados en el cuadro A.1. En la selección de estaciones se ha hecho hincapié en la disponibilidad y continuidad de datos periódicos y en la cobertura espacial de la cuenca. Las ponderaciones aplicadas a los distintos registros se han calculado usando el método de polígonos de Thiessen y también se incluyen en el cuadro A.1. La ubicación geográfica de las estaciones se indica en el cuadro A.5.

Cuadro A.1 Estaciones de medición del agua caída con registros periódicos usados en el modelo hidrológico de la Cuenca alta del Río Moche, superficies calculadas con el método Thiessen y ponderaciones aplicadas a los registros

Nombre de la estación	Superficie (km <sup>2</sup> )	Ponderación Thiessen
Sisincap	518,78	0,283
Julcan	301,54	0,165
Virgen de la Puerta	498,25	0,272
Quirivilca	269,27	0,147
Laredo	238,74	0,130

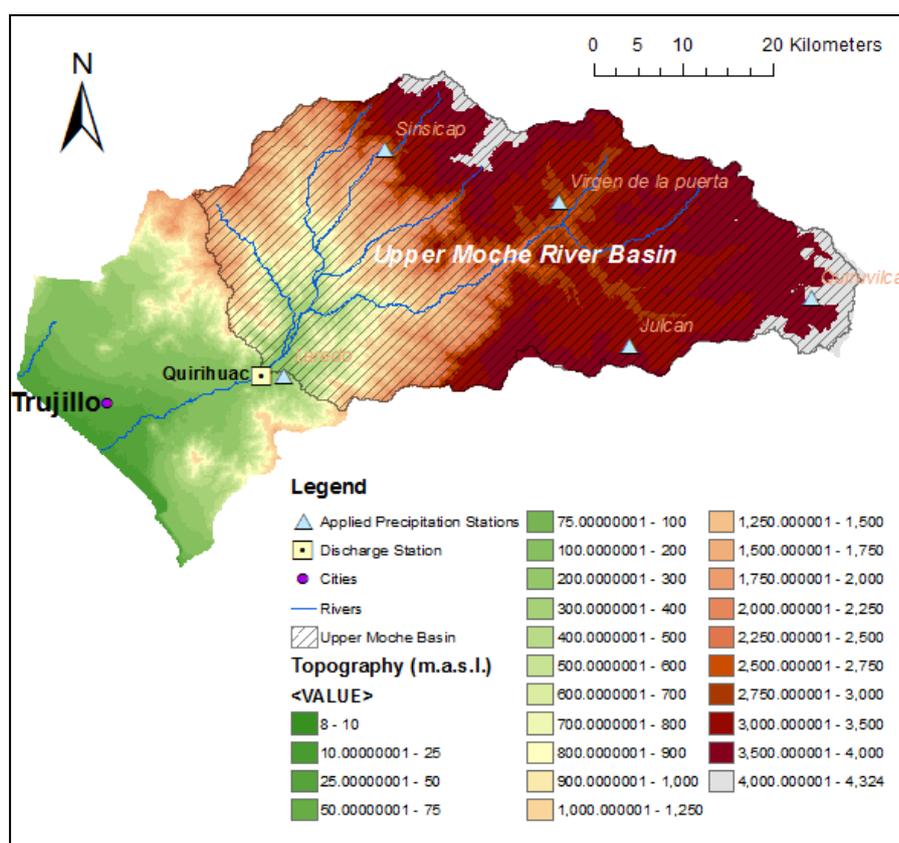


Gráfico A.1 Ubicación geográfica de las estaciones hidrológicas usadas en la simulación con modelos de la escorrentía en la Cuenca alta del Río Moche.

Además del agua caía en la cuenca el modelo necesita datos sobre la evapotranspiración potencial. El modelo no permite procesar este tipo de datos con la misma eficacia que los datos sobre precipitación. Por tanto, en este caso se usaron las estimaciones mensuales promedio Penman-Monteith obtenidas en la estación Chachapoyas. La estación Chachapoyas está situada a 2.540 metros sobre el nivel del mar y se considera que es representativa de las condiciones en la cuenca.

## A.2.1 Calibración del modelo

El modelo se calibró con registros sobre descarga de la estación de Quirihuac para el período de 1992-2004. Los resultados se indican en los gráficos A.4 y A.5. Se advierte que el equilibrio hídrico a largo plazo está bien simulado (la desviación con respecto a las observaciones es de solo 1 %). Si bien el equilibrio hídrico es adecuado en la mayoría de los años considerados, en ciertos años (por ejemplo, 1998 y 1999) solo es aceptable. En el gráfico A.7, el equilibrio hídrico estacional se subestima un poco al comienzo de la estación húmeda (noviembre y diciembre) y

se sobrestima al comienzo de la estación seca ( junio-agosto). El resto de los meses están muy bien simulados. Cabe señalar que el modelo simula muy bien los años secos y los años húmedos (véase el gráfico A.5). Por esto, y porque se da por supuesto que las desviaciones de las descargas simuladas y observadas son pequeñas en comparación con las incertidumbres en la evaluación de los factores del cambio climático y la estimación de la recarga del acuífero del Moche, se considera que el modelo calibrado permite simular los efectos del cambio climático con suficiente exactitud para este estudio de caso.

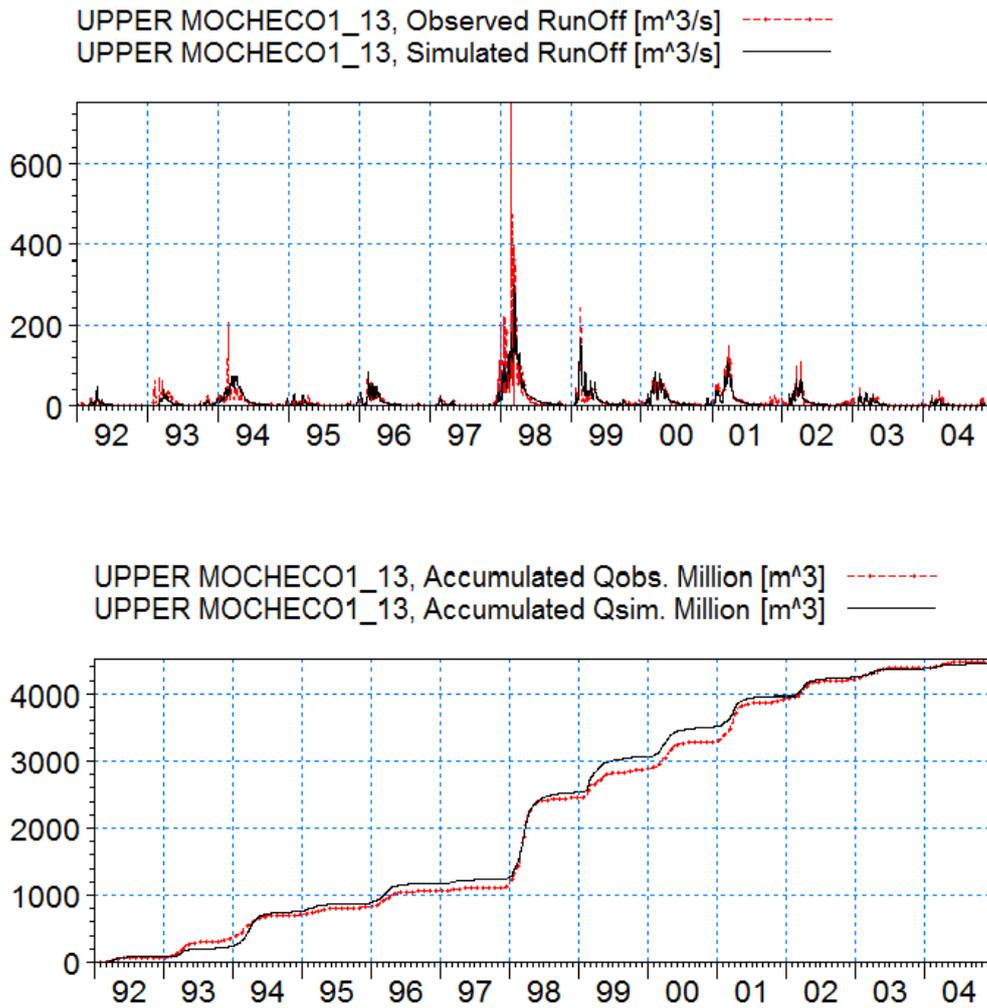


Gráfico A. 2 Calibración del modelo NAM para la Cuenca del Río Moche (período completo, 1992 -2004). Error WB del 1% (descarga observada = 190 mm/año; descarga simulada = 188 mm/año); R2 = 0.64

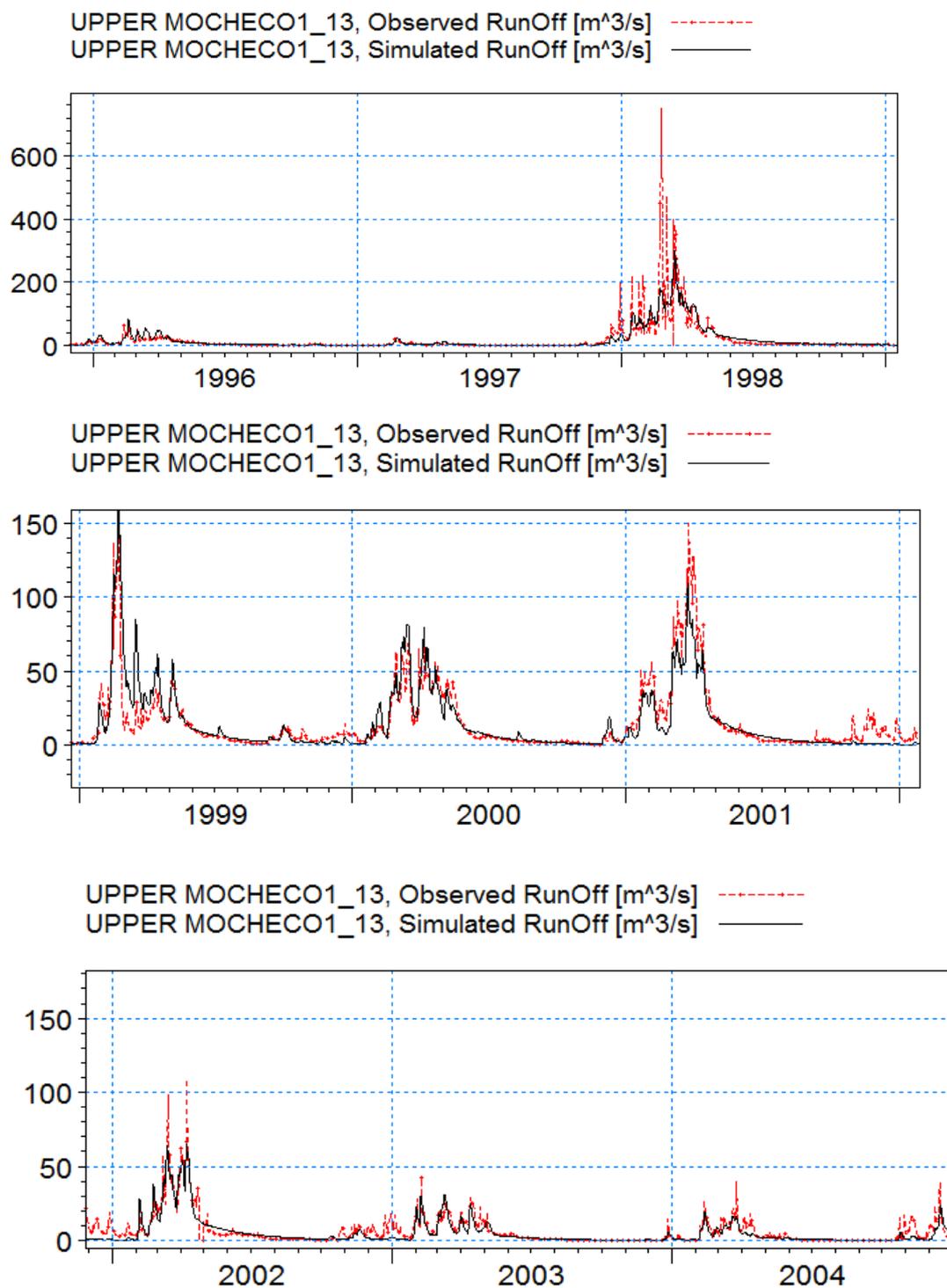


Gráfico A.3 Calibración del modelo NAM para la Cuenca del Río Moche. Detalles de la calibración para determinados años, incluidos años secos y húmedos.

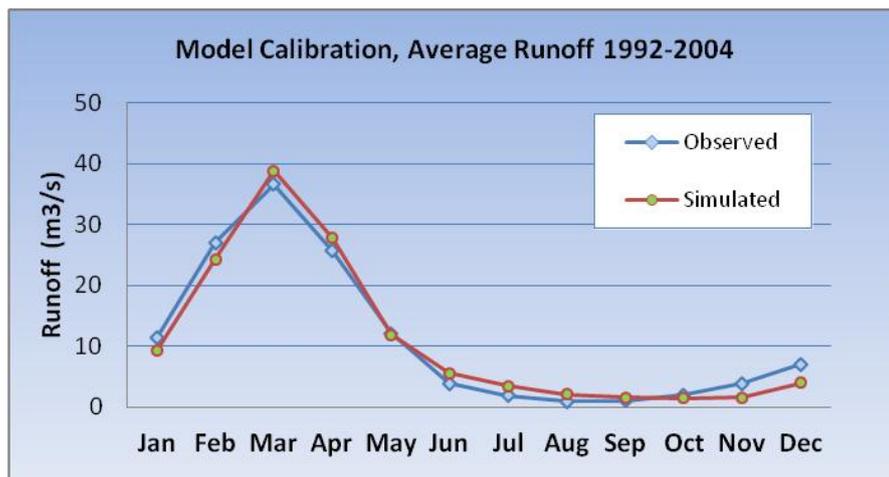


Gráfico A. 4 Calibración del modelo NAM para la Cuenca del Río Moche. Correntía promedio mensual simulada y observada.

### A.3. Simulación de los efectos del cambio climático

El modelo calibrado se ha usado para simular dos escenarios de cambio climático: un escenario optimista, examinado desde el punto de vista del suministro de agua, en que se da por supuesto un aumento pequeño de la temperatura (0,4 ° C) combinado con un aumento importante de la lluvia caída (+10%); y un escenario más pesimista, en que un incremento considerable de la temperatura (+1,2 ° C) se combina con una reducción del 10% de la lluvia caída. Los escenarios analizados se describen en **(Error! No se encontró la fuente de referencia)** y son los más extremos entre los cuatro escenario que surgen al combinar los límites de los escenarios de cambio climático descritos en la sección **(Error! No se encontró la fuente de referencia)** del informe principal. Los valores de la evapotranspiración potencial se indican en el contexto del clima actual y de las estimaciones para los escenarios seco y húmedo en el futuro. La variación promedio de la evapotranspiración potencial se indica en el cuadro A.2 y las variaciones mensuales se señalan en el gráfico A.5.

Dado que el modelo de las afluencias aguas abajo en el acuífero del Moche, que se constituyó en el marco de un estudio anterior (Referencia 5), está basado en un caudal mensual seguro del 75% (excedente de causal el 75% del tiempo), estos caudales se obtuvieron del modelo hidrológico para el clima actual y para los escenarios seco y húmedo en el futuro. Los resultados se indican en el cuadro A.3, y se aclaran con ejemplos del agua de superficie en el gráfico A.6 y de las contribuciones de agua subterránea en el gráfico A.7. Los factores del cambio anual promedio, que se han computado para usarlos en nuevos análisis, se indican en el cuadro A.3. Los factores de variación del caudal *Fof* y *Fbf* de aguas de superficie y subterráneas se definen de la manera siguiente, respectivamente:

$$Fof = Q75pres/Q75 CC$$

$$Fbf = BF75pres/BF75cc$$

en que:

Q75pres es el 75% de escorrentía segura simulada con datos sobre el clima actual;

Q75cc es el 75% de escorrentía segura simulada con datos sobre cambio del clima;

BF75pres es el 75% de caudal básico simulado con datos sobre el clima actual;

BFcc es el 75% de caudal básico simulado con datos sobre cambio del clima.

Cuadro A. 2 Escenarios simulados de cambio climático

Cambio en la temperatura	Factor de cambio en la precipitación	Factor estimado de cambio de la EtO	Incluido en el análisis
Grados Celcius	Fracción	Fracción	-
+0,4	1,1	1,02	Sí, estimación optimista
+0,4	0,9	1,02	No
+1,2	1,1	1,04	No
+1,2	0,9	1,04	Sí, estimación optimista

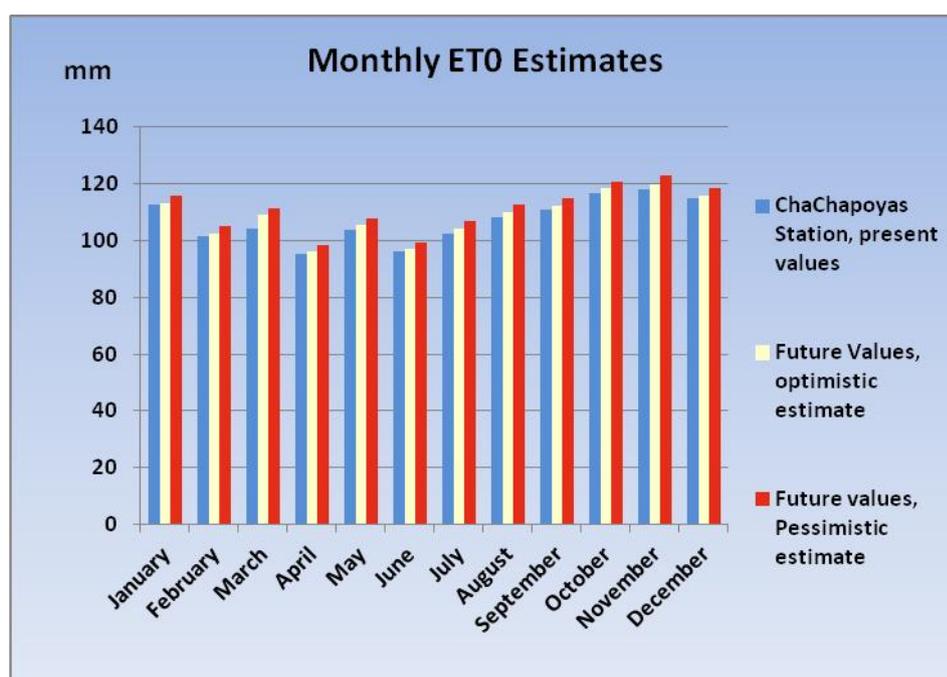


Gráfico A. 5 Estimaciones Penman Monteith de la evapotranspiración de referencia mensual en la Cuenca del Río Moche en los escenarios actual, optimista y pesimista, dando por supuesto un aumento de la temperatura de 0, +0,4 y +1,2 ° C, respectivamente.

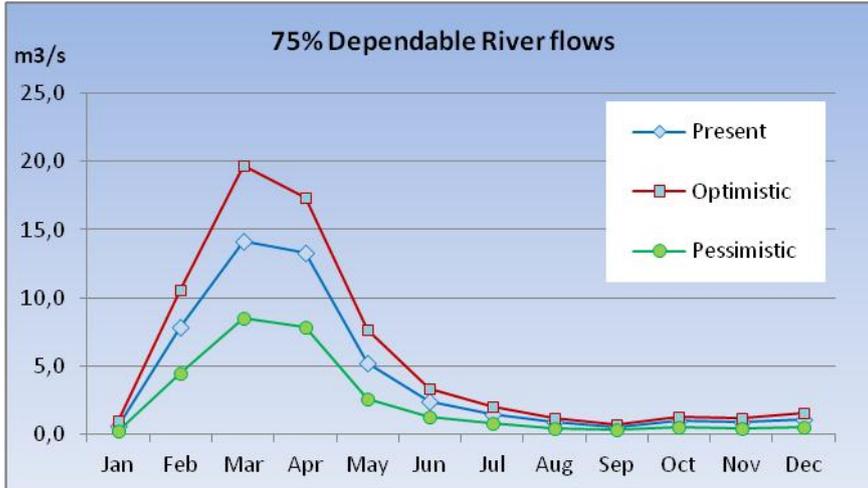


Gráfico A. 6 El 75% del caudal mensual seguro del Río Moche en Cuirihuac, en las condiciones actuales y en los escenarios optimista y pesimista del clima en el futuro.

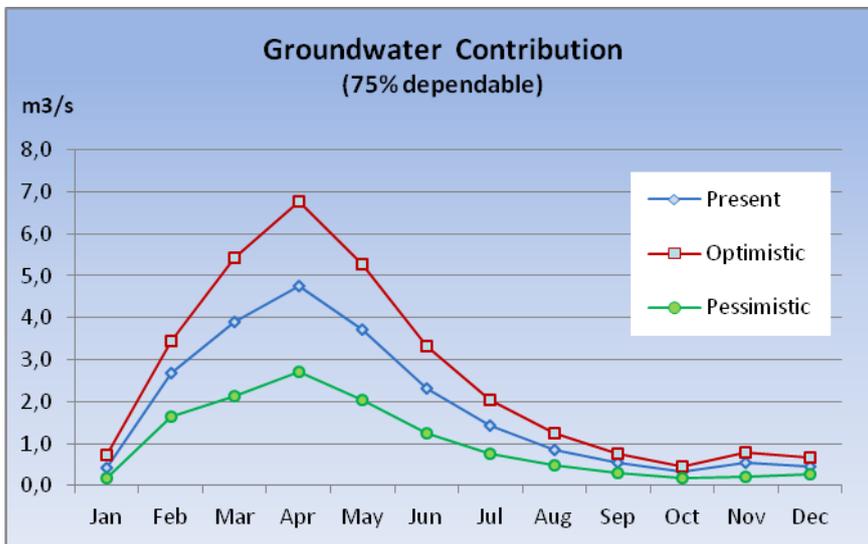


Figure A. 7 El 75% de las contribuciones seguras del agua subterránea al Río Moche aguas arriba de Cuirihuac, en las condiciones actuales y en los escenarios optimista y pesimista del clima en el futuro.

Cuadro A.3 Cambios simulados en el caudal del Río Moche y la contribución del agua subterránea en la estación de Chuirihuac en las condiciones actuales y en los dos escenarios de clima. Los factores de cambio promedio en relación con la situación actual se indican en negrilla.

Caudal del río															
Escenario		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Factor del cambio
Actual	Promedio	9,8	26,2	41,0	28,9	12,2	6,0	3,7	2,3	1,7	1,5	1,6	3,0	11,5	1,00
Húmedo	Promedio	13,1	33,4	51,3	36,0	15,6	7,7	4,8	2,9	2,2	2,2	2,4	4,4	14,7	1,27
Seco	Promedio	6,0	18,2	29,7	20,2	8,2	4,2	2,6	1,6	1,1	0,8	0,8	1,6	7,9	0,69
Actual	Q75	0,6	7,8	14,1	13,3	5,2	2,4	1,4	0,9	0,5	0,9	0,9	1,1	4,1	1,00
Húmedo	Q75	1,0	10,6	19,7	17,3	7,6	3,3	2,0	1,2	0,7	1,3	1,2	1,6	5,6	<b>1,37</b>
Seco	Q75	0,3	4,5	8,5	7,9	2,6	1,3	0,8	0,5	0,3	0,6	0,4	0,5	2,3	<b>0,57</b>
Caudal básico															
Escenario		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Factor del cambio
Actual	Promedio	2,5	6,6	12,4	13,6	9,3	5,9	3,6	2,2	1,4	1,0	0,8	0,9	5,0	1,00
Húmedo	Promedio	3,4	8,3	15,4	17,1	11,9	7,6	4,7	2,9	1,8	1,3	1,2	1,3	6,4	1,28
Seco	Promedio	1,4	4,3	8,8	9,6	6,5	4,1	2,5	1,5	1,1	0,6	0,4	0,5	3,4	0,69
Actual	Q75	0,4	2,7	3,9	4,8	3,7	2,3	1,4	0,9	0,5	0,3	0,6	0,4	1,8	1,00
Húmedo	Q75	0,7	3,4	5,4	6,8	5,3	3,3	2,0	1,2	0,8	0,5	0,8	0,7	2,6	<b>1,41</b>
Seco	Q75	0,2	1,6	2,1	2,7	2,0	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2	0,3	1,0	<b>0,55</b>

## A.4 Referencias

Referencia 16 Ministerio del Ambiente, SENAMHI (2012), DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS SANTA, RIMAC Y MANTARO BAJO CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL HORIZONTE 2030-2039.

Referencia 17 Ministerio del Ambiente, SENAMHI (2009), Escenarios del cambio climático en el Perú al 2030, Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, Resumen.

Referencia 18 Ministerio del Ambiente, SENAMHI (2010), Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Referencia 19 MIKE BY DHI (2011).MIKE 11, "A Modelling System for Rivers and Channels", Manual de referencia.

Referencia 20 Chavimochic(2008?), Proyecto especial de Chavimochic. Modelo matemático de simulación del acuífero del Río Moche.

## Gráficos

### **Gráfico A.1**

Kilómetros  
Cuenca alta del Río Moche  
Leyenda  
Estaciones climatológicas  
Estaciones de descarga  
Ciudades  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche  
Topografía (msnm)  
Valor

### **Gráfico A.2**

MOCHE ALTO Escorrentía observada  
MOCHE ALTO Escorrentía simulada  
Millones  
Qobs. acumulados  
Qsim. acumulados

### **Gráfico A.4**

Calibración del modelo, escorrentía promedio  
Escorrentía  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic  
Observada  
Simulada

### **Gráfico A.5**

Estimaciones mensuales de la EtO  
Estación de Chachapoyas, valores actuales  
Valores futuros, estimación optimista  
Valores futuros, estimación pesimista  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic

### **Gráfico A.6**

75% del caudal seguro del río  
Actual  
Optimista  
Pesimista  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic

### **Gráfico A.7**

Contribución del agua subterránea (75% seguro)  
Actual  
Optimista  
Pesimista  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic

## B. Efectos del cambio climático en el acuífero del Río the Moche

### B.1 Introducción

El acuífero del Río Moche es una de las fuentes de SEDALIB para el suministro de agua en Trujillo y una fuente de agua para riego en el Valle del Moche. En este estudio de caso los efectos climáticos en el bombeo sostenible desde el acuífero se han analizado usando un modelo de aguas subterráneas.

Dado el alcance limitado de este estudio no fue posible reconsiderar la calibración del modelo ni hacer una nueva calibración del mismo. Por consiguiente, se da por supuesto que permite simular adecuadamente las condiciones del acuífero.

### B.2 El modelo de agua subterránea constituido por CHAVIMOCHIC

El modelo, que inicialmente fue constituido para Chavimochic (Referencia 1) a fin de analizar los escenarios de bombeo para reducir la congestión de drenajes, está basado en el sistema de simulación de aguas subterráneas MODFLOW (Referencia 2). Este es un modelo de diferencia finita en dos dimensiones del acuífero del Río Moche que abarca desde la estación de medición de Quirihuac río arriba y la costa río abajo. La ciudad de Trujillo está situada al centro del área incluida en el modelo y la zona urbanizada cubre una parte importante del acuífero modelado. El alcance del modelo está indicado por un rectángulo azul en el gráfico B.1 y el acuífero se indica con amarillo en los mapas. La discretización del modelo es 25m x 25 m.

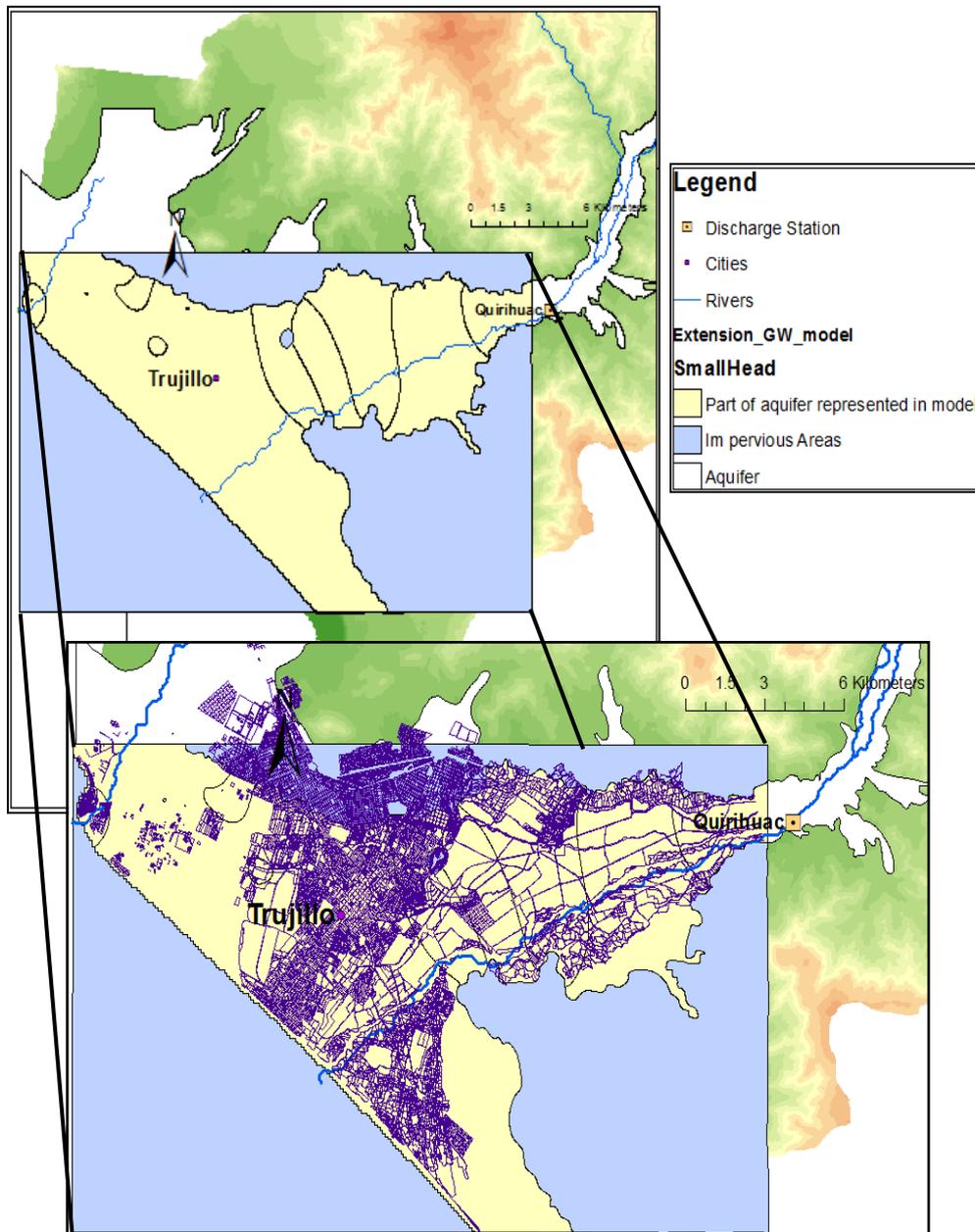
El acuífero es freático y está formado por depósitos aluviales cuaternarios. En el modelo, las capas que contienen el acuífero son impermeables. El modelo se elaboró usando información hidrogeológica de junio de 2004 y se calibró con datos de ese año.

En es estudio inicial (Referencia 1) se estudiaron varios escenarios con el objetivo de bajar el nivel de agua subterránea en ciertas zonas estratégicas de Trujillo. El escenario que ofrecía mejores perspectivas (Escenario 3) comprendía un volumen total de bombeo de 0,520 m<sup>3</sup>/s en los pozos de SEDALIB y el bombeo en otros pozos recomendados por las autoridades de Chavimochic. Este escenario, que se tradujo en una reducción de entre 0,5 y 3,5 metros del nivel del agua subterránea, fue recomendado por Chavimochic y en este estudio de caso se ha usado como patrón para el escenario que representa las condiciones actuales. En el análisis hecho en este estudio de caso solo se han considerado cambios en la modalidad de bombeo en los pocos de SEDALIB. El resto del bombeo es el mismo que en el escenario inicial (Escenario 3).

En el modelo, el acuífero se recarga por medio de tres fuentes:

1. La infiltración desde Río Moche, que depende del caudal del río. Se ha estimado que esta agua solo representa una fracción del 75% del flujo seguro del río en la estación de Quirihuac.
2. Los flujos subterráneos desde la sección alta del acuífero estudiada en el informe de la simulación (Referencia 1), que ascienden a 15,23 millones de  $m^3/(=0,48 m^3/s)$ .
3. Las fugas desde los canales de riego y la percolación de los campos en el valle. Si bien estas recargas son las principales entradas al acuífero, en los escenarios analizados son prácticamente constantes, y oscilan entre 2,73  $m^3/s$  y 2,78  $m^3/s$ . Esto supone un abastecimiento total para riego todo el tiempo, independientemente del clima, lo que en el desierto es una premisa plausible.

La Referencia 1 contiene más información sobre la constitución y calibración del modelo y los escenarios anteriores.



## Gráfico B.1 Cobertura del modelo Chavimochic del acuífero del Río Moche

### B.2.1 Escenario de bombeo en las condiciones actuales

No se dispone de datos detallados sobre la distribución del bombeo actual en los pozos de SEDALIB. Por consiguiente, en el modelo las condiciones de bombeo se han representado modificando el bombeo en los pozos de SEDALIB descrito en el Escenario 3 de Chavimochic del volumen total de 0,52 m<sup>3</sup>/s considerado inicialmente en el plan general de SEDALIB de 2005 (Referencia 4), al volumen total actual de 0,745 m<sup>3</sup>/s indicado en el plan general de SEDALIB de 2012 (Referencia 3). Los pozos de SEDALIB se han identificado con nombres y el bombeo en los pozos especificados se ha incrementado con el mismo factor a fin de obtener el volumen total actual. Se estima que esta aproximación es suficientemente precisa para el análisis en este estudio de caso.

### B.3 Simulación de los efectos del cambio climático en el acuífero

Los efectos del cambio climático en el acuífero se han analizado simulando el escenario actual de bombeo en base a las entradas en los escenarios de clima seco y húmedo. Los resultados en estos dos escenarios se compararon con un escenario de referencia de las condiciones actuales de bombeo en el marco hidrológico existente en este momento, o sea, las entradas consideradas inicialmente en el escenario 3 de Chavimochic.

La precipitación en la zona baja del Valle del Moche es insignificante y se estima que un posible incremento menor de la evaporación potencial en esa zona se equilibra con un aumento de la importación de agua para riego. Por tanto, los efectos del cambio climático en el acuífero se han simulado modificando la entrada de agua subterránea en el límite río arriba del modelo y las fugas desde el río.

Inicialmente, la recarga desde el río se calculó con una profundidad supuesta de dos metros en el río, y la conductividad entre el río y el acuífero se calibró hasta alcanzar el nivel calculado de infiltración. Este es un largo proceso de calibración y en este estudio no es posible repetirlo. En cambio, se supone que la profundidad del río fluctúa linealmente con el caudal. Esto no estrictamente correcto, aunque el supuesto parece justificarse dada la fuerte incertidumbre del pronóstico climático y la falta de exactitud en la descripción de la interacción entre el agua subterránea y el agua de superficie en este tipo de modelo. Por tanto, en ambos escenarios de cambio climático la profundidad del río se ha alterado usando factores de cambio identificados mediante los análisis de la corriente de lluvia caída para el 75% del caudal seguro (véase el apéndice A). Del mismo modo, se alteró la entrada inicial de agua subterránea en el límite alto del modelo usando los factores de cambio para el 75% de las contribuciones seguras de agua subterránea. En el cuadro B.1 se indican los parámetros consiguientes.

#### Cuadro B.1 Parámetros aplicados para alterar las entradas de agua en el modelo de agua subterránea del acuífero del Río Moche en las

estimaciones del cambio climático en los escenarios actual, húmedo y seco.

Escenario 3		Actual	Húmedo	Seco
Entrada de agua subterránea	m <sup>3</sup> /s	0,47	0,66	0,26
Profundidad del río	m	2	2,81	1,09

### B.3.1. La situación actual

La profundidad simulada de la capa freática en las condiciones actuales se indica en el gráfico B.2, en que las áreas más oscuras de azul representan zonas con profundidad estimada inferior a un metro y las áreas más claras de azul representan zonas donde la profundidad es mayor (> 10m).

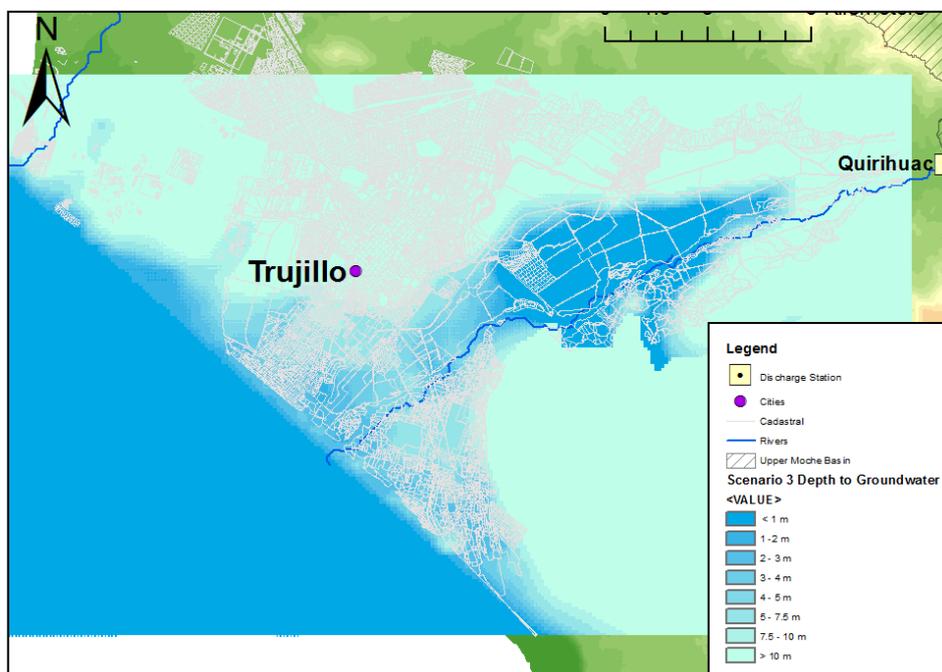


Gráfico B.1 Profundidad de la capa freática simulada en el escenario 3 de bombeo considerado inicialmente, que fue elaborado por CHAVIMOCHIC (Referencia 1) y usado como referencia en este estudio de caso.

### B.3.2. Condiciones del agua subterránea en los futuros escenarios de clima previstos

#### B.3.2.1. El nivel actual de bombeo en un clima hipotético futuro

Los niveles de agua subterránea se han simulado para los dos escenarios de clima futuros. En los gráficos B.3 y B.4 se indica el aumento del nivel freático en relación con el nivel actual en un escenario de clima seco y en un escenario de clima húmedo, respectivamente.

Dado que la entrada de agua subterránea al acuífero y el caudal del río se reducen, en un futuro de clima más seco los niveles de agua subterránea también

serán más bajos (gráfico B.3). Los efectos agregados en los niveles de agua subterránea se indican en el cuadro B.2, en que se observa una caída promedio de 1,2 metros en el nivel del acuífero como un todo y una caída promedio de 0,9 metros en la sección del acuífero donde la profundidad de la capa freática es actualmente inferior a cinco metros.

Los niveles de agua indicados en los gráficos se obtuvieron del modelo tras seis años de simulación en un momento en que los niveles se han estabilizado. Puesto que no se han observado indicios de una disminución de los niveles es dado concluir que el nivel actual de bombeo es sostenible incluso en un escenario de clima más seco.

En el escenario de clima húmedo (gráfico B.4) los niveles de agua subterránea aumentan en todo el acuífero debido al aumento del caudal del río y la entrada de agua subterránea. Se estima que en promedio el aumento es de 0,52 metros en el acuífero como un todo y de 0,32 metros en la sección en que el agua ya se encuentra a menos de cinco metros de la superficie (cuadro B.2).

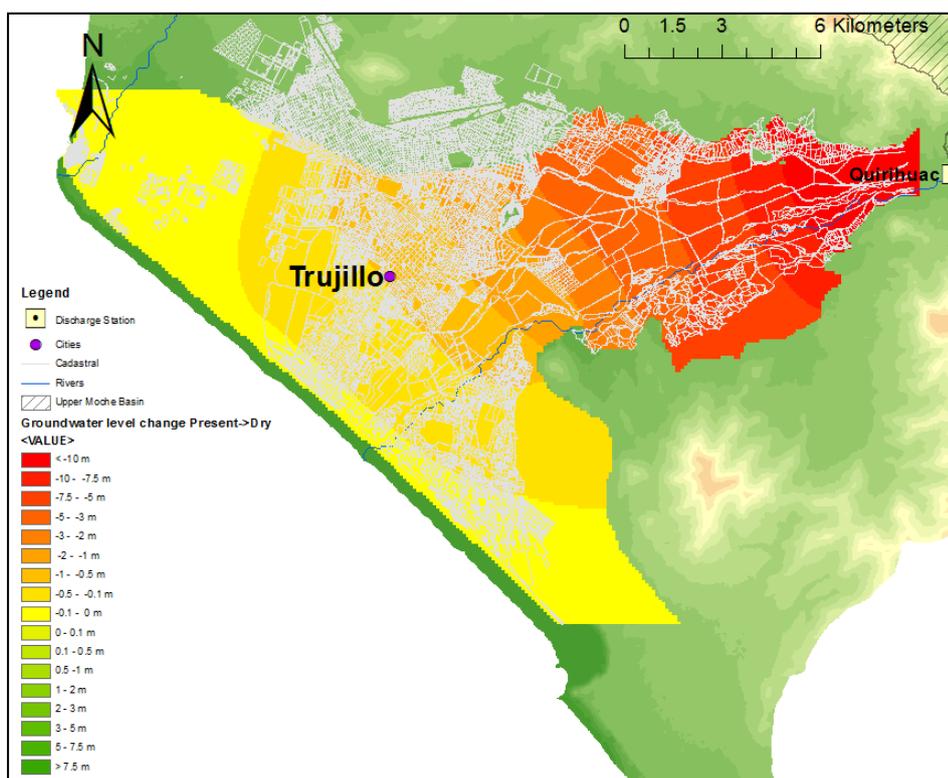


Gráfico B.2 Incremento simulado del agua subterránea desde los niveles actuales a los niveles existentes en un escenario de clima seco. Los valores negativos indican una reducción de la capa freática.

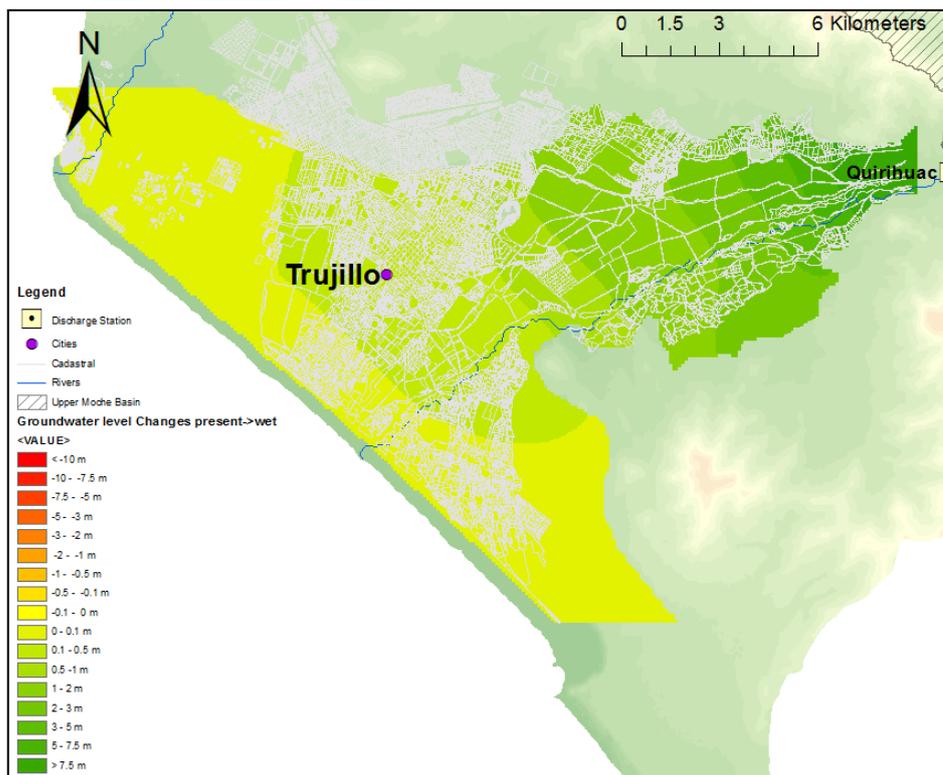


Gráfico B.3 Incremento simulado del agua subterránea desde los niveles actuales a los niveles existentes en un escenario de clima húmedo. Los valores negativos indican una reducción de la capa freática.

Cuadro B.2 Aumentos simulados del nivel de agua subterránea en el acuífero del Valle de Moche (condiciones actuales de bombeo) en un escenario de clima futuro. Las variaciones se indican como “máximo”, “mínimo” y “promedio” en el acuífero como un todo y en la sección del acuífero donde la distancia simulada entre el agua subterránea y la superficie es inferior a cinco metros. Las dos áreas de agregación se indican en el gráfico B.5.

Clima futuro	Superficie de la muestra	MÍN	MÁX	PROMEDIO
Seco	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	-11,34	0,00	-1,19
Seco	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	-5,14	0,00	-0,88
Húmedo	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	0,00	7,73	0,52
Húmedo	Distancia desde la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	0,00	2,21	0,32

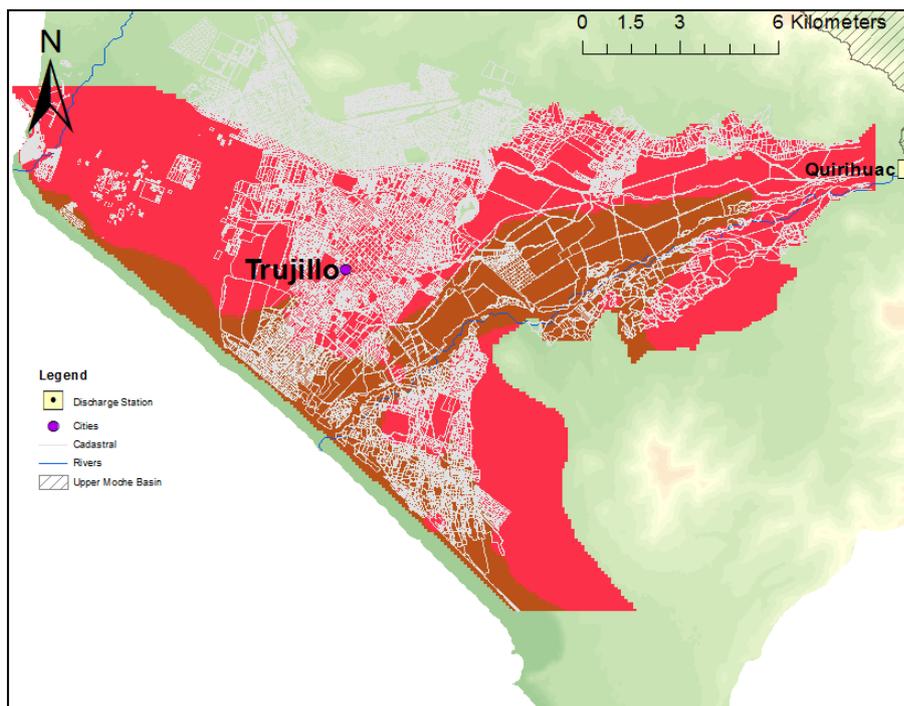


Gráfico B.4 Áreas de agregación: todo el acuífero (rojo) y el área donde la profundidad simulada de la capa freática es inferior a cinco metros en el escenario 3 (café).

#### B.3.2.2. El bombeo en escenarios futuros de clima

El Plan maestro de SEDALIB de 2005 (Referencia 4) comprende un pronóstico de la futura demanda de agua en Trujillo y un propuesto incremento del bombeo en el acuífero del Moche a fin de satisfacer esa demanda (gráfico B.6). Para satisfacer la demanda hasta 2018 se propone aumentar el bombeo de 520 l/s (la tasa de 2005) a 1500 l/s en 2018.

Los escenarios de cambio climático usados en este estudio de caso abarcan hasta 2030 y, por consiguiente, es improbable que se produzca un cambio completo de clima dentro del horizonte del previsto escenario de bombeo de 2005-2018. No obstante, se consideró necesario determinar si el propuesto incremento del bombeo será sostenible en el marco del clima previsto en el futuro y analizar sus efectos en los niveles de agua subterránea.

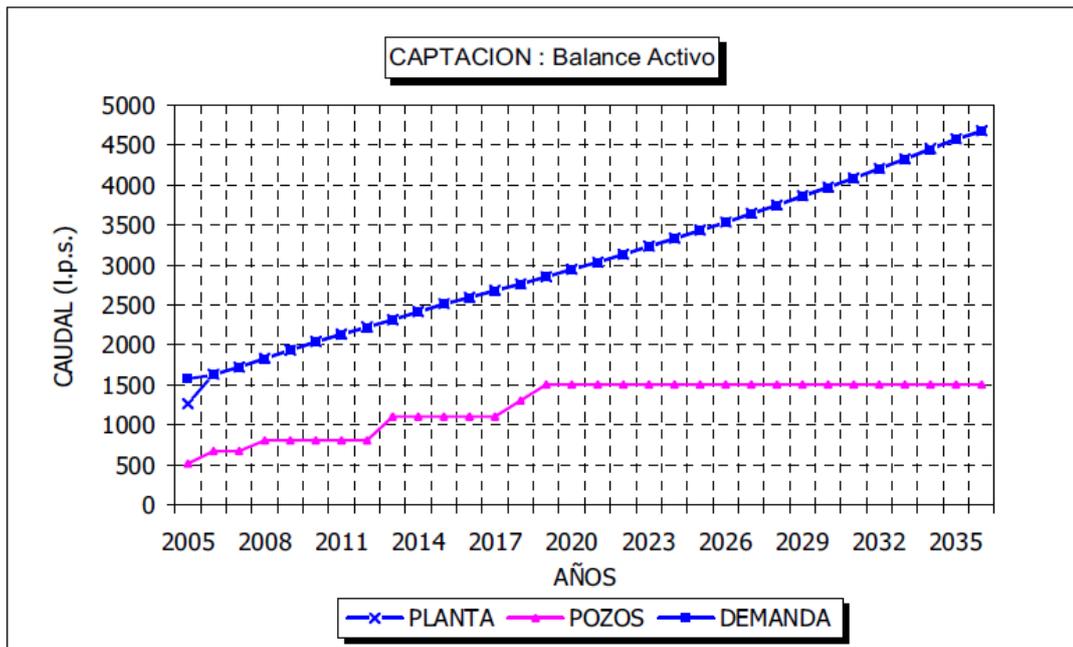


Gráfico B.5 Previsto aumento del bombeo en el acuífero para satisfacer la creciente demanda (SEDALIB, 2005) (Referencia 4).

Por tanto, las tasas de bombeo en los pozos de SEDALIB en el escenario actual de extracción se han aumentado al nivel propuesto de 1500 l/s usando el mismo factor de incremento en todos los pozos. Por añadidura, el escenario de bombeo se ha sometido a condiciones de clima seco y clima húmedo. Los resultados se indican en los gráficos B.7 y B.8, donde se señalan las fluctuaciones en los niveles de agua subterránea en los escenarios de clima seco y clima húmedo, respectivamente.

Es de interés destacar que el incremento de los niveles de agua subterránea en un clima más húmedo puede controlarse aumentando el bombeo en los pozos de SEDALIB a un nivel total de 1500 l/s y que en esas condiciones los niveles de agua subterránea bajo la ciudad incluso se reducirían en relación con los actuales. Se estima que, en promedio, la variación sería de +0,74 metros en el acuífero como un todo y de -0,64 metros en las secciones que actualmente tienen niveles elevados de agua subterránea (cuadro B.3).

Un clima seco en el futuro, junto con un incremento de la tasa de bombeo a 1.500 l/s causará una reducción del nivel de aguas subterráneas, lo cual no es sorprendente. Se prevé que, en promedio, los niveles se reducirán en 5,8 metros en el acuífero como un todo y en 4,5 metros en la sección donde el agua se encuentra a menos de cinco metros de la superficie. Cabe señalar que los nuevos niveles parecen estabilizarse dentro del período de simulación de seis años y que, por tanto, en el escenario de clima seco el aumento de las tasas de bombeo parece ser sostenible. También se observa que, aunque cerca de la costa las variaciones en el nivel de aguas son pequeñas, en esa zona los niveles previstos son muy cercanos a cero metros sobre el nivel del mar. Por consiguiente, deberá hacerse un minucioso seguimiento del nivel del agua a fin de reducir el bombeo

y evitar la intrusión salina si los niveles del agua subterránea empiezan a reducirse aun más en esta zona.

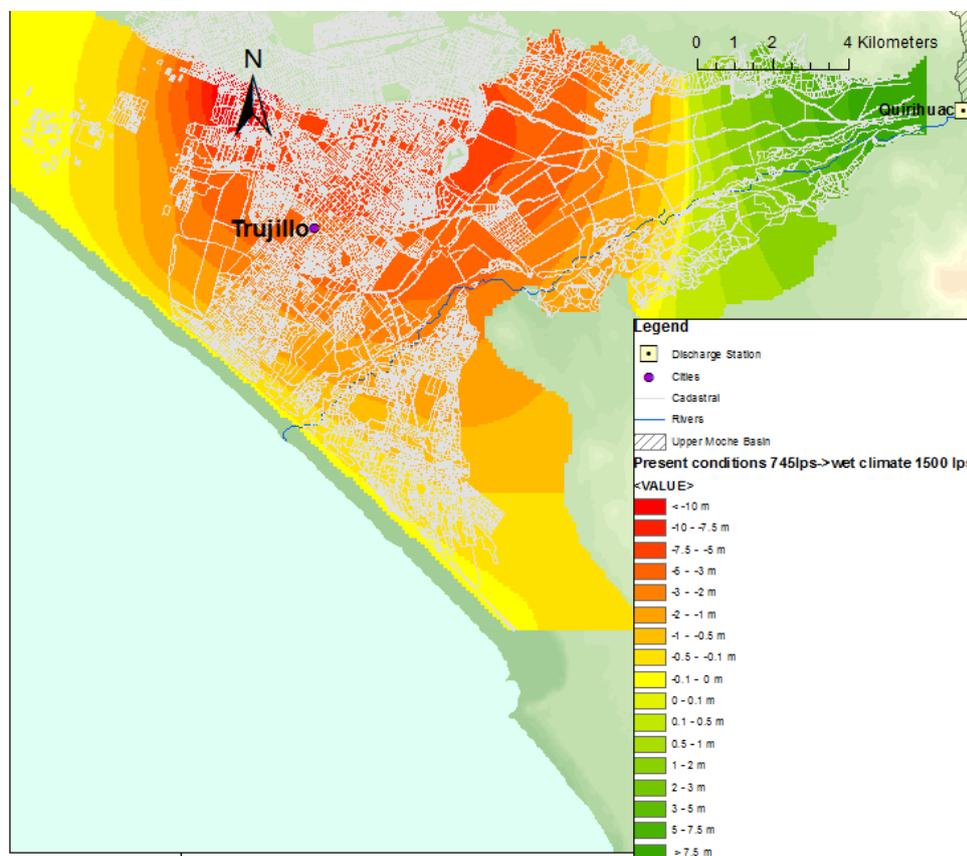


Gráfico B.6 Cambios en la profundidad del nivel freático en un escenario de clima más húmedo si el nivel de bombeo en los pozos de SEDALIB es de 1.500 l/s.

Cuadro B.2 Aumentos simulados del nivel de agua subterránea en el acuífero del Valle de Moche, de las condiciones actuales de bombeo y clima a un futuro escenario de clima seco con un volumen de bombeo de 1500 l/s . Las variaciones se indican como “máximo”, “mínimo” y “promedio” en el acuífero como un todo y en la sección del acuífero donde la profundidad simulada de la capa freática es inferior a cinco metros. Las dos áreas de agregación se indican en el gráfico B.5.

Clima futuro	Área de la muestra	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
Seco	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	-41,96	0,00	-5,76
Seco	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	-14,92	0,00	-4,46
Húmedo	Todo el acuífero (195,2 km <sup>2</sup> )	-7,10	20,48	0,74
Húmedo	Distancia de la superficie < 5m (58,4 km <sup>2</sup> )	-2,58	1,57	-0,64

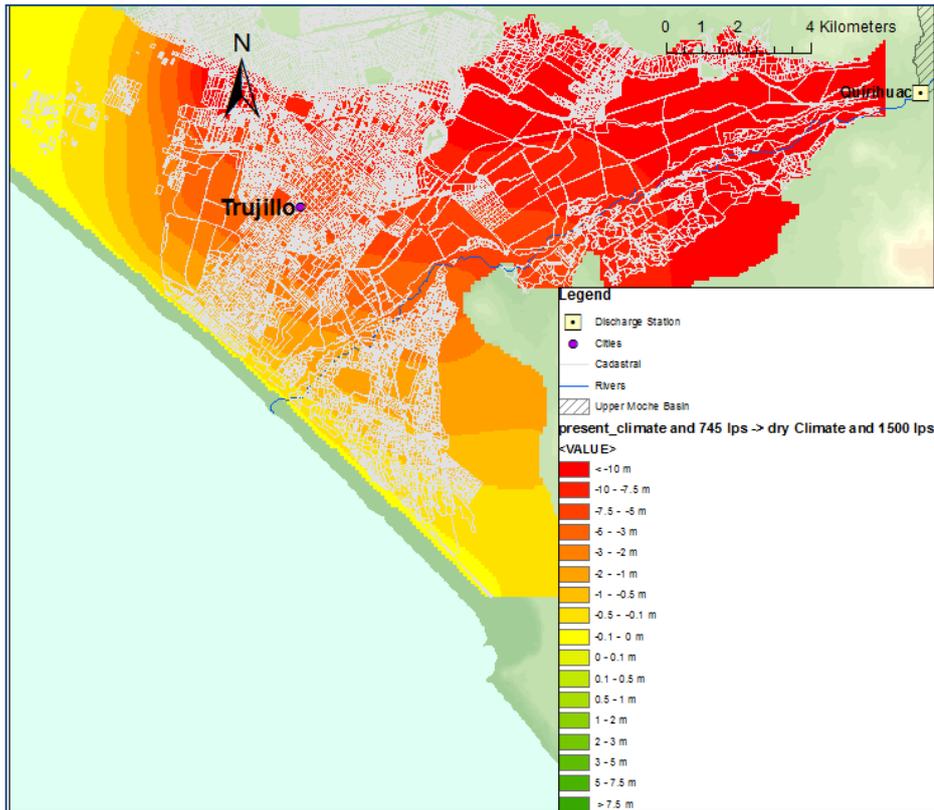


Gráfico B.7 Cambios en la profundidad del nivel freático en un escenario de clima más seco si el nivel de bombeo en los pozos de SEDALIB es de 1.500 l/s.

#### B.4 Referencias

Lista de referencias usadas en este apéndice

Referencia 21 Chavimochic (2008?), Proyecto especial de Chavimochic, Modelo matemático de simulación del acuífero Moche.

Referencia 22 Visual Modflow (2012),  
<http://www.swstechnology.com/groundwater-modeling-software/visual-modflow-flex>

Referencia 23 SEDALIB (2012), Plan maestro optimizado, EPS SEDALIB S.A. período de 2012 -2042.

Referencia 24 SEDALIB (2005), Plan maestro optimizado, 2005-2035.

## **Gráficos**

### **Gráfico B.1**

Leyenda  
Estación de descarga  
Ciudades  
Ríos  
Cobertura del modelo de agua subterránea  
Cobertura del modelo  
Parte del acuífero representada en el modelo  
Terreno impermeable  
Acuífero

### **Gráfico B.2**

Leyenda  
Estación de descarga  
Ciudades  
Catastro  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche  
Escenario 3 Profundidad de la capa freática  
VALOR

### **Gráfico B.3**

Leyenda  
Estación de descarga  
Ciudades  
Catastro  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche  
Fluctuación del nivel actual de agua subterránea en un clima seco  
VALOR

### **Gráfico B.4**

Leyenda  
Estación de descarga  
Ciudades  
Catastro  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche  
Fluctuación del nivel de agua subterránea actual en un clima húmedo  
VALOR

### **Gráfico B.5**

Leyenda  
Estación de descarga  
Ciudades  
Catastro  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche

### **Gráfico B.7**

Estación de descarga  
Ciudades  
Catastro  
Ríos

Cuenca alta del Río Moche  
Condiciones actuales (745 lps) clima húmedo (1.500 lps)  
Clima húmedo  
VALOR

Gráfico B.8  
Estación de descarga  
Ciudades  
Catastro  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche  
Clima actual y 745 lps Clima seco y 1.500 lp  
VALOR

## Adaptación al cambio climático en el sector de riego; componentes propuestos del proyecto

### C.1 Antecedentes

El riego reviste gran importancia para la economía y el bienestar social de Trujillo. Por consiguiente, el análisis de los efectos del cambio climático en el sector es relevante.

Un examen acabado de las necesidades del sector en cuanto a suministro de agua, posibles iniciativas para ahorrarla y posibilidades de desarrollo es, en sí, una tarea de gran magnitud. Este apéndice contiene un resumen de los aspectos más importantes a considerar en ese estudio.

Las planicies costeras alrededor de Trujillo son prácticamente desérticas. Como se indica en la sección 5 del informe principal, incluso un cambio porcentual significativo de la precipitación no tendrá un efecto importante en la demanda de agua para cultivo en esta zona. No obstante, el aumento de la temperatura probablemente aumentará la demanda de agua de regadío en un 6 % anual y en un 7 % durante el mes de mayor demanda (diciembre).

Cabe subrayar que un análisis detallado de las medidas de adaptación solo es relevante si se determina que el sector de riego puede ser afectado por los previstos cambios climáticos. En un escenario de recursos abundantes, como el actual, un análisis minucioso podría no ser necesario, aunque la congestión de drenajes puede presentar problemas que requieren mayor atención. La situación podría cambiar si el sistema se amplía. En esa situación se necesitaría más agua y el recurso podría hacerse más escaso, en cuyo caso deberá considerarse un estudio más detallado.

### C.2 Componentes

Un estudio más acabado de la adaptación al cambio climático en el sector de riego deberá incluir, entre otros, los aspectos señalados a continuación. Se necesitará una participación activa de todas las partes interesadas, incluidos el Proyecto Chavimochic, los agricultores locales y las empresas de riego.

#### C.2.1 Efectos del cambio climático en el caudal de los ríos de la zona

No existen indicios de una reducción causada por el clima del caudal del Río Santa en el futuro inmediato. Si el agua de los ríos Chao, Virú, Moche y Chicama o de los acuíferos alimentados por esos ríos se usa para el riego, deberá hacerse un estudio más detallado del cambio climático en sus zonas de captación aguas arriba pues se ha determinado que el Río Moche puede sufrir los efectos del previsto cambio climático en la parte alta de su cuenca.

Los efectos de estos cambios en el caudal del río y la recarga de los acuíferos podrían examinarse usando un enfoque hidrológico similar al aplicado en este estudio. No obstante, se recomienda usar modelos de aguas subterráneas que incluyan un mejor análisis de las aguas subterráneas y de superficie a fin de mejorar los estudios de la percolación y la infiltración, que son bastante poco sofisticados.

### C.2.2 Inventario de los cultivos de regadío

Deberá hacerse un inventario de los cultivos de regadío (tipo y cobertura). Esto podría hacerse en base a un análisis de teleobservación y consultas con las partes interesadas en la zona. Deberán esclarecerse los criterios usados para la selección de los distintos tipos de cultivo, por ejemplo, las utilidades, la tradición, la idoneidad del suelo y el clima, la resistencia de los cultivos, los aspectos de mercado, etc.

### C.2.3 Demanda actual de agua y pérdidas

Deberá hacerse un análisis de las tecnologías de riego usadas. También deberá establecerse cual es la demanda de agua para cultivos y riego. Deberán determinarse el volumen de aguas distribuidas y las pérdidas incurridas (de operación, transporte y utilización), junto con los nombres de los destinatarios del agua perdida y las posibles estrategias para volver a usarla.

Deberá hacerse un estudio del equilibrio hídrico global de los sistemas de riego, así como de la interacción que existe entre sus diversos componentes, mediante modelos integrados de la distribución del agua y del riego que incluyan los aspectos de agua subterránea y agua de superficie.

### C.2.4 Costos y utilidades actuales de la producción

Para comprender mejor el sistema actual y crear la base para proponer medidas realistas de adaptación, deberán delineararse con claridad los costos y utilidades, las limitaciones y las oportunidades existentes en el sistema de producción. Este análisis deberá diferenciarse en base a los tipos de cultivo y las tecnologías de riego y, de ser necesario, el acceso al financiamiento.

### C.2.5 Evolución del mercado

Los aspectos de mercado del sistema actual de producción, junto con la posible evolución y las oportunidades existentes, deberán evaluarse mediante un proceso de consulta con las partes interesadas y un análisis de los mercados nacional e internacional.

### C.2.6 Posible nuevas tecnologías para el ahorro de agua y su costo

Deberán investigarse las posibilidades para ahorrar agua o mejorar los drenajes mediante la introducción de tecnologías más avanzadas. También deberán hacerse análisis costo-beneficio y evaluarse la aplicabilidad de esas tecnologías desde los puntos de vista técnico, económico, sociológico, financiero y ambiental. En este análisis podría usarse la experiencia adquirida en los ámbitos nacional e internacional.

### C.2.7 Posible adopción de cultivos que permiten ahorrar agua

También deberá determinarse si el reemplazo de ciertos cultivos es una buena medida de adaptación y si esos cambios serían viables.

### C.2.8 Aspectos sociales y financieros; disposición de la población al cambio

Deberá hacerse un examen de la percepción que la población local tiene de la vulnerabilidad frente al cambio climático y de su disposición y capacidad para adaptarse.

### C.2.9 Propuesto plan de adaptación

Se deberán especificar y categorizar posibles medidas de adaptación, y deberá proponerse un plan de adaptación que, tras examinarse con las partes interesadas, se enmendará en base a las opiniones recibidas.

**Gráfico 1**

Cuenca del Río Moche  
Cuenca del Río Santa  
Río Moche  
Principal Canal de Chavimochic  
Río Santa  
Perú

**Gráfico 4.4**

Cuenca alta del Río Moche  
Leyenda  
Estaciones climatológicas  
Estaciones de descarga  
Ciudades  
Ríos  
Cuenca alta del Río Moche  
Topografía (msnm)  
Valor

**Gráfico 4.5**

Calibración del modelo, correntía promedio  
Correntía  
Observada  
Simulada  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic

**Gráfico 4.6**

75% del caudal confiable del río  
Actual  
Optimista  
Pesimista  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic

**Gráfico 4.7**

Contribución de las aguas subterráneas  
Nivel del 75% de confiabilidad  
Actual  
Optimista  
Pesimista  
Ene  
Abr  
Ago  
Dic

**Gráfico 4.8**

Leyenda  
Estación de descarga  
Ciudades  
Ríos  
Cobertura del modelo de agua subterránea  
Parte del acuífero representada en el modelo  
Terreno impermeable

Acuífero

**Gráfico 4.9**

Leyenda

Estación de descarga

Ciudades

Catastro

Ríos

Cuenca alta del Río Moche

Fluctuación del nivel actual de agua subterránea en un clima seco

VALOR

**Gráfico 4.10**

Leyenda

Estación de descarga

Ciudades

Catastro

Ríos

Cuenca alta del Río Moche

Fluctuación del nivel de agua subterránea actual en un clima húmedo

VALOR

**Gráfico 4.11**

Kilómetros

Leyenda

Estación de descarga

Ciudades

Catastro

Ríos

Cuenca alta del Río Moche

**Gráfico 13**

Estación de descarga

Ciudades

Catastro

Ríos

Cuenca alta del Río Moche

Condiciones actuales

Clima húmedo

VALOR

**Gráfico 14**

Estación de descarga

Ciudades

Catastro

Ríos

Cuenca alta del Río Moche

Clima actual

Clima seco

VALOR

**Gráfico 5.1**

Evaporación de referencia (EtO) en Trujillo

ETO actual

Grados

Ene

Abr

Ago

Dic

**Gráfico 6.1**

Comienzo

¿Soy vulnerable en el clima actual?

¿Cómo me va a afectar el cambio climático?

¿Qué debo hacer?

¿Tengo suficiente información?

Determinar, evaluar e implementar medidas de adaptación

Obtener más información

Mantener la relevancia